



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Pevnost lepených spojů bórem legovaných ocelí s povlakem AlSi

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály

Autor práce: **Bc. Michal Bašus**

Vedoucí práce: Ing. Pavel Doubek, Ph.D.



Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Bašus**
Osobní číslo: **S14000344**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Pevnost lepených spojů bórem legovaných ocelí s povlakem AlSi**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznámení se s problematikou technologie lepení a aplikací lepidel při stavbě karoserie.
2. Popis základních charakteristik bórem legovaných ocelí a způsoby jejich zpracování.
3. Charakteristika povlaků AlSi a jeho proměny při tváření za tepla.
4. Stanovit metodiky zkoušek pevnosti lepeného spoje.
5. Zjistit vliv stavu povrchu AlSi po tváření při odlišných technologických podmínkách na statickou a dynamickou pevnost lepeného spoje.
6. Vyhodnocení naměřených výsledků.
7. Diskuse výsledků, závěr.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

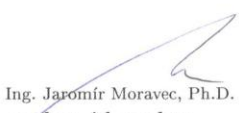
- [1] BROCKMANN, W., GEISS, P., L., KLINGEN, J., SCHRÖDER, B. *Adhesive Bonding*, WILEY - VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009, s. 414, ISBN 978-527-31898-8.
- [2] ASM HANDBOOK. *Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000, s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
- [3] Články v odborných časopisech.
- [4] Technické materiály od výrobců a zpracovatelů lepidel a plechů.
- [5] Technické normy ČSN, EN, ISO.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Doubek, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie
Konzultant diplomové práce: **Ing. Michaela Kolnerová, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **1. listopadu 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **1. dubna 2018**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. listopadu 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tom- to případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 23. 5. 2017

Podpis:

Pevnost lepených spojů bórem legovaných ocelí s povlakem AlSi

Anotace

Cílem práce je posouzení lepeného spoje dvou vysokopevnostních plechů 22MnB5 s AlSi povlakem, vytvořeného pomocí dvou epoxidových lepidel. Pro vysokopevnostní plechy byla použita různá doba tepelného zpracování, aby byl prokázán vliv AlSi povlaku po tepelném zpracování na pevnost lepeného spoje. Následně byly provedeny zkoušky pevnosti a jejich vyhodnocení, určení typu porušení lepeného spoje pomocí optické a elektronové mikroskopie. V rámci práce byla posuzována i dynamická únosnost spoje, s ohledem na crashové namáhání těchto spojů v automobilové karoserii.

Klíčová slova: vysokopevnostní plech, epoxidová lepidla, AlSi povlak, lepený spoj, statická zkouška, dynamická zkouška, typ porušení

Strength of the bonded joints of the boron-alloyed steel with AlSi Coating

Annotation

The aim of this Diploma thesis is assessment of bonded joints of two ultra high strength steel 22MnB5 plates with AlSi coating created with two types of epoxy glue. Different processing time was used for ultra high strength steel plates to prove AlSi coating effect of on bonded joint strength after heat treatment. Then strength measures have been processed with its assessment and determination of bonded joint damage type with optical and electron microscopy as well. Also dynamic strength joint was being examined within this diploma thesis with regard to these bonded joints crash strain in car bodywork.

Key words: ultra high strength steel, epoxy glue, AlSi coating, bonded joint, strength measures, dynamic measures, damage type

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval firmě Škoda Auto a.s., konkrétně útvaru Materiálová technika a speciální maření, skupině Kovy a technika povlaků, za poskytnuté zázemí a vybavení laboratoře, dále pak za cenné rady a konzultace Ing. Tomáši Schiffmannovi. Další poděkování bych rád věnoval Ing. Pavlu Doubkovi, Ph.D. a Ing. Michaelae Kolnerové, Ph.D. za cenné připomínky a rady, týkající se zpracování diplomové práce.

.....
Michal Bašus

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21122/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

Obsah

Seznam použitých symbolů a značek	9
1. Úvod	11
2. Teoretická část	13
2.1. Klasifikace ocelí používaných v konstrukci automobilů	13
2.2. Bórem legované martenzitické oceli	14
2.2.1. Ocel 22MnB5	14
2.2.2. Technologie výroby martenzitických ocelí	16
2.2.3. AlSi ochranná vrstva	18
2.3. Technologie lepení	20
2.3.1. Postup technologie lepení:	21
2.4. Základní teorie lepení	22
1) Molekulová teorie (adsorpční)	22
2) Elektrostatická teorie	23
3) Mechanická teorie	23
4) Difuzní teorie	23
5) Chemická teorie	23
2.4.1. Rozdělení lepidel	24
2.5. Proces lepení při stavbě karoserie automobilu	24
2.5.1. Lepidla pro lepení karosérií automobilů	26
2.6. Hodnocení vlastností lepidel	27
2.6.1. Zkouška pevnosti lepených spojů v odlupování (dle ISO 11339)	27
2.6.2. Zkouška pevnosti ve smyku při zatěžování tahem (dle normy PV 12.35)	27
2.6.3. Dynamická odolností slepů vůči porušení rázem (dle ISO 11343)	28
2.7. Vyhodnocení typu porušení lepeného spoje (dle ISO 10365)	29
2.7.1. Porušení závislá na substrátu	29
2.7.2. Porušení závislá na lepidle	30
3. Experimentální část	31
3.1. Úvod k experimentální části	31
3.2. Použitý substrát a lepidla	31
3.3. Analýza povrchové vrstvy	34
3.3.1. Analýza povrchové vrstvy AlSi	37
3.4. Analýza lepených spojů testovaných staticky	48

3.4.1.	Vzorky testované za pokojové teploty (+23 °C)	49
3.4.2.	Vzorky testované za snížené teploty (-35 °C)	52
3.4.3.	Vzorky testované za zvýšené teploty (+80 °C)	55
3.4.4.	Shrnutí výsledků smykové zkoušky	59
3.5.	Analýza porušení lepených spojů testovaných staticky	60
3.5.1.	Analýzy lomových ploch	60
3.6.	Analýza lepených spojů testovaných dynamicky	69
3.6.1.	Analýza porušení lepených spojů testovaných dynamicky	73
4.	Shrnutí výsledků	77
5.	Závěr	81
	Seznam použité literatury	82

Seznam použitých symbolů a značek

Označení	Popis	Jednotka
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
A_{80mm}	Tažnost	[%]
σ_s	Pevnost v odlupu	[MPa]
F	Zatěžující síla	[N]
b	Šířka vzorku	[mm]
P_s	Střední hodnota pevnosti	[MPa]
S	Slepená plocha vzorku	[mm ²]

Zkratka	Význam
HSS	High – Stength Steel - oceli s vysokou mezí pevnosti
AHSS	Advanced High Strength Steel – moderní vysokopevnostní oceli
UHSS	Ultra High – Stength Steel - oceli s extrémně vysokou mezí pevnosti
BH	Bake Hardening - BH efekt umožňuje zvýšení meze kluzu při teplo- tách vypalování laku
TRIP	Transformation Induced Plasticity - označení oceli s transformačně indukovanou plasticitou
TWIP	Twinning Induced Plasticity - označení oceli se základním me- chanismem plastické deformace dvojčatěním
HS - IF	High Strength - Interstitial Free – nízkouhlíková ocel bez intersti- ciálního zpevnění
IF	Interstitial Free – ocel bez intersticiálního zpevnění
MILD	Běžná nízkouhlíková ocel
HSLA	High Strength Low Alloy – vysokopevnostní ocel s nízkým obsahem příměsí
DP	Dual Phase - dvou fázové oceli
CP	Complex Phase – vícefázové oceli
MS	Martensitic Steel – martenzitická ocel
FB	Ferrite-bainite steel – feriticko-bainitická ocel
MnB	Boron steel – bórová ocel
HF	Hot Forming – tváření za tepla
AlSi	Hliníko-křemičitý povlak

KTL	Katodforézní lakování
SF	Porušení substrátu
CSF	Kohezní porušení substrátu
DF	Delaminační porušení
AF	Adhezní lom
SCF	Speciálně kohezní porušení
CF	Kohezní porušení
REM	Rastrovací elektronový mikroskop
EDX	Elektronová disperzní spektroskopie
TZ	Tepelné zpracování
RT	Pokojová teplota
PVC	Polyvinylchlorid

1. Úvod

V současné době výroba automobilů neustále roste a tím se i zvyšuje konkurence mezi jednotlivými automobilovými výrobci. Automobilové závody musí být konkurence schopné, ale zároveň musí být schopné uspokojovat stále se zvyšující nároky zákazníků, ať už je to spolehlivost, bezpečnost, atraktivní design, jízdní vlastnosti, úsporné motory, informační technologie a v neposlední řadě také cena. Další aspekty, které musí dnešní automobily splňovat jsou legislativní předpisy, jako jsou například hodnoty vyprodukovaného CO₂, atd..

Aby byli výrobci automobilů schopni uspokojit tyto legislativní a zákaznické požadavky, musí vyrábět automobily, které mají nízkou spotřebu paliva, nízkou hmotnost a zároveň vysokou bezpečnost. Již nyní se výrobci automobilů snaží vyrábět díly ze speciálních ocelí či slitin hliníku, hořčíku ale i z kompozitních materiálů jako jsou karbon nebo polymery plněné skelnými vlákny. Všechny tyto materiály se vyznačují velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, při zachování nízké hmotnosti. Výroba karbonu je velmi nákladná, a proto se používají hlavně u sportovních vozů či vozů vyšších tříd a to především na masivní díly karoserie automobilu, jako je kapota, střecha, difuzor a další, kde je úspora váhy nejvýznamnější.

Dalším z hlavních problémů ocelových karoserií automobilů je jejich nízká korozní odolnost. Proto je nutné karoserii před korozí chránit například pomocí organických a anorganických povlaků. Pro ocelové plechy se nejčastěji používá jako povrchová ochrana zinek, nanášený elektrolyticky či žárově. Mnohé pokusy ukázaly, že lze již tak dobré korozní vlastnosti zinku vylepšit přidáním hořčíku [8]. Tato kombinace zinku a hořčíku se již dříve používala ve stavebnictví, kvůli méně kvalitnímu povrchu. Dnes už ale výrobci dokáží vytvořit povrch dostatečně kvalitní, aby splňoval nároky pro výrobu karoserie automobilu.

Další vlivy, které ovlivňují výrobu karoserie automobilu, jsou šroubové, nýťované, svařované a pájené spoje. Při montování šroubových a nýtových spojů může dojít k poškození ochranné povrchové vrstvy a tím ke snížení korozní odolnosti v daném místě. U svarových spojů dochází při svařovacím procesu k vnášení velkého množství tepla do materiálu a tím dochází ke změně jeho vnitřní struktury. Pokud je jako povrchová ochrana použit zinek, může dojít při svařování k jeho odpaření (není na škodu), či ke vzniku nežádoucích slitin a reakcí zinku s železem. Pevnost těchto

spojů je naštěstí dostačující. Pokud je použito například bodové svařování, musí se dodržet minimální vzdálenost bodů mezi sebou, aby byl díl dostatečně tuhý.

Na některých místech karoserie není možné šroubové, nýtové ani svarové spoje použít, ať už z konstrukčních či estetických důvodů. Proto jediným možným řešením je použití technologie lepení.

Použití lepeného spoje při výrobě karoserie automobilu přináší řadu výhod, jako jsou například, těsnost, zvýšení tuhosti karoserie, či snížení hluku a vibrací, které se při jízdě přenáší do interiéru. Nejen tyto vlastnosti, ale i další napomáhají k tomu, že se lepidla začínají hojně využívat při stavbě karoserie automobilů. Tyto aspekty mají za následek zvyšující se nároky na povrchovou ochranu používaných ocelových materiálů, které jsou právě lepidly spojovány a to hlavně z hlediska přilnavosti lepidel k této povrchové ochranné vrstvě.

U dnešních moderních automobilů se pro výrobu bezpečnostních dílů karoserie používají vysokopevnostní oceli s označením 22MnB5. Díly z těchto ocelí se vyrábějí technologií tváření za tepla, která klade zvýšené nároky jak na samotný materiál plechu, tak hlavně na jeho povrchovou ochranu. V současnosti existuje mnoho různých druhů povrchových ochranných ocelových plechů, ať už od klasických zinkových povlaků, přes AlSi povlaky, až k ZnMgAl povlakům.

Cílem diplomové práce je hodnocení vlivu povlaku AlSi na spojování vysokopevnostních plechů z oceli 22MnB5 pomocí epoxidových lepidel. Aby byl prokázán vliv technologie tváření za tepla, konkrétně doby tepelného zpracování plechu s AlSi povlakem na pevnost lepeného spoje, byly spojované vysokopevnostní plechy připraveny s různou dobou tepelného zpracování – 8, 12 a 16 minut. Jako první byl zvolen interval 8 minut, který nejvíce odpovídá době tepelného zpracování při výrobě dílů z oceli 22MnB5. Interval 12 minut byl volen s ohledem na vznik případných komplikací během výroby, a tedy dojde k navýšení jeho doby tepelného zpracování. Poslední interval byl 16 minut a to jako extrémní případ, který by při výrobě dílů neměl nastat.

2. Teoretická část

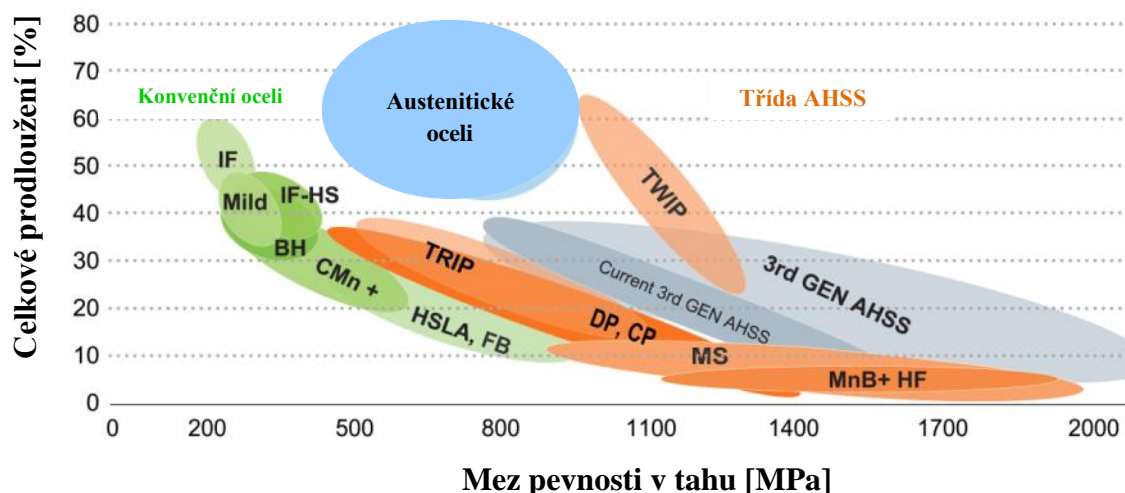
2.1. Klasifikace ocelí používaných v konstrukci automobilů

Oceli určené pro automobilový průmysl je možno rozlišovat podle různých hledisek. V technické praxi se nejvíce uplatňují tři základní metody klasifikace.

Jako první je rozdělení ocelí podle metalografie, viz obrázek 2.1. Tato klasifikace rozděluje oceli do tří skupin. První z nich jsou nízkopevnostní oceli do kterých patří IF a MILD oceli. Druhou skupinou jsou standartní HSS oceli jako jsou HS – IF, BH a HSLA oceli. Ve třetí skupině jsou oceli vysokopevnostní tzv. AHSS jako jsou například DP, CP, TRIP, TWIP a MS oceli.

Druhou metodou rozdělení ocelí je podle jejich mechanických vlastností a to na oceli HSS, které mají mez kluzu mezi 210–550 MPa a pevnost v tahu 270–770 MPa a oceli UHSS s mezí v kluzu větší než 550 MPa a s pevností v tahu vyšší než 770 MPa.

Třetí metoda klasifikace je založena na posuzování tvářecích vlastností ocelí. Jsou to například jejich vhodnost pro tváření, celková pružnost, zpevnění a roztažnost materiálu.

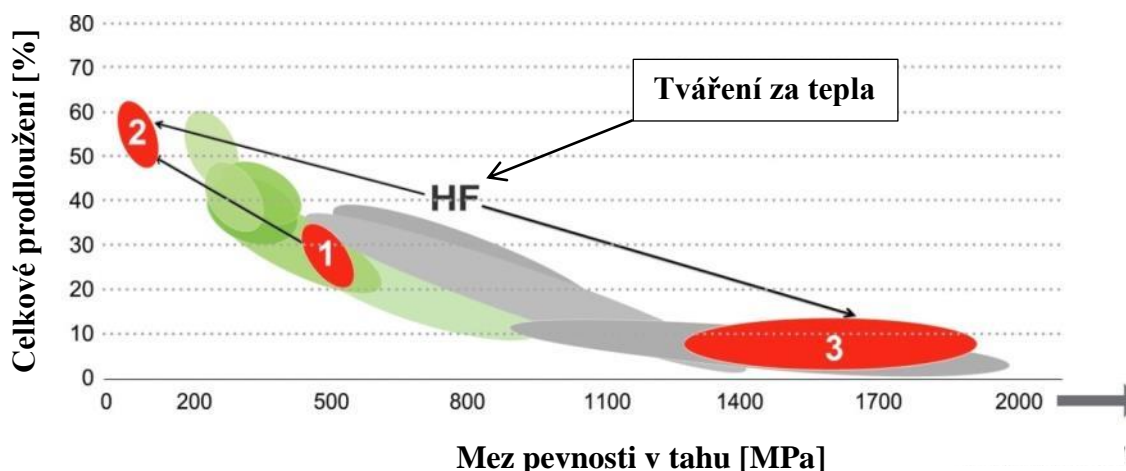


Obr. 2.1: Rozdělení vysokopevnostních ocelí podle metalografie[1]

2.2. Bórem legované martenzitické oceli

2.2.1. Ocel 22MnB5

Materiál 22MnB5 je ocel válcovaná za studena vhodná pro kalení a popouštění. Je to materiál s vysokou mezí pevnosti a velmi dobrou tvařitelností. Její použití je vhodné hlavně pro výrobky, které vyžadují tvařitelnost při jejich zpracování a vysokou pevnost pro hotový díl. Požadovanou pevnost a tvrdost se u těchto ocelí docílí tvářením a zároveň probíhajícím tepelným zpracováním. Na obrázku 2.2 je zobrazeno, jak se mění mechanické vlastnosti tohoto materiálu při tvářením za tepla s následným kalením ve tvářecí formě.



Obr. 2.2: Mechanické vlastnosti vysokopevnostních materiálů během tvářením za tepla a kalení.[2]

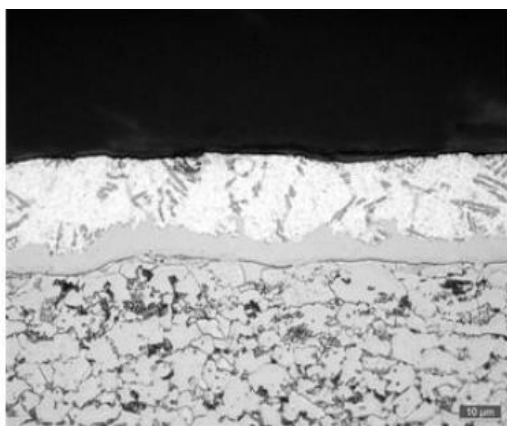
- 1- mechanické vlastnosti polotovaru;
- 2- mechanické vlastnosti při ohřevu na teplotu austenitu;
- 3- mechanické vlastnosti hotového tvářeného a kalného materiálu

Tyto oceli se v automobilovém průmyslu používají hlavně pro bezpečnostní prvky karoserie automobilu, jako jsou například nárazníky, A a B sloupky, díly podlahy automobilu, atd. viz obrázek 2.3.

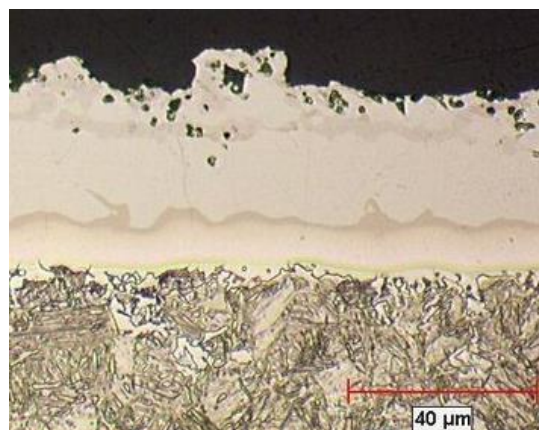


Obr. 2.3: Využití vysokopevnostních, ultra vysokopevnostních (9,6 %, vyznačeno oranžově) a za tepla tvářených ocelí (14,5 %, vyznačeno červeně) na skeletu karoserie[3]

Ocel 22MnB5 obsahuje 0,2–0,27 % uhlíku, 0,15–0,4 % křemíku, 1,1–1,4 % manganu a 0,002–0,005 % bóru plus další přísadové prvky jako titan, molybden atd.. Díky malému množství bóru se oceli nazývají též jako „Bórové oceli“. Hodnoty meze pevnosti a meze kluzu se před tepelným zpracováním u těchto ocelí pohybují mezi 480–700 MPa pro R_m a 310–550 MPa pro $R_{p0,2}$. Hodnoty mechanických vlastností souvisí s technologií výroby a to hlavně na způsobu válcování (za tepla, za studena) a zda jsou s povlakem či bez povlaku. Vnitřní struktura materiálu před kalením a lisováním je feriticko-perlitická, viz obrázek 2.4. Tato struktura se při ohřevu přemění na austenit, který má velmi dobrou tvařitelnost. Po kalení a lisování se struktura přemění na čistě martenzitickou se zbytkovým austenitem, viz obrázek 2.5.



Obr. 2.4: Metalografický výbrus materiálu před tvářením a kalením [4]



Obr. 2.5: Metalografický výbrus materiálu po tváření a kalení [4]

Díky martenzitické vnitřní struktuře této oceli je možné více kusové sestavy dílů (svařence) nahradit jedním komplexním dílem, který má stejnou či větší pevnost a zároveň nižší hmotnost, než svařovaný díl. Oba způsoby výroby dílů jsou znázorněny na obrázku 2.6.



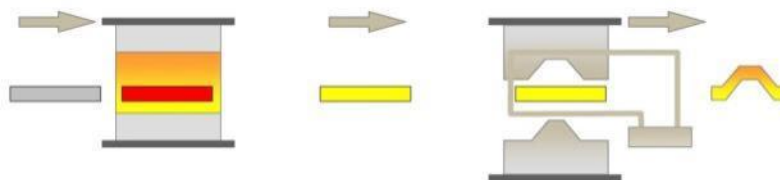
Obr. 2.6: Vlevo je B sloupek vyráběný parciálním zušlechťováním, kdy se materiál kalí na dvou místech na různou teplotu a díl je z jednoho kusu materiálu. Vpravo je B sloupek vyrobený svařováním ze tří částí. [5]

Jako polotovary se používají za studena i za tepla válcované plechy bez povlaku či s organickými (nátěrové hmoty, plastové povlaky, opryžování) nebo anorganickými povlaky (pokovení, smalty, keramické povlaky), pozinkované plechy, nebo plechy s AlSi vrstvou. Jak již bylo poznamenáno výše, vysoké mechanické vlastnosti dosahují borové oceli až následným tvářením a tepelným zpracováním.

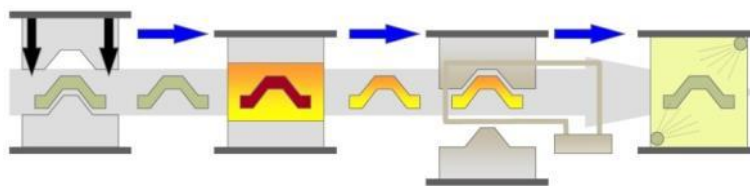
2.2.2. Technologie výroby martenzitických ocelí

Tato výrobní technologie spojuje výhodu tváření za tepla, kterou se vyrábí komplexní hlubokotažné díly bez výrazného zpětného odpružení materiálu, s martenzitickým kalením, při kterém se pevnost oceli mnohonásobně zvýší. U martenzitického kalení se materiál ohřeje do oblasti austenitu (cca. 880–940 °C). Při této teplotě se feriticko-perlitická struktura transformuje na austenitickou. Dále následuje kalení (prudké ochlazení na teplotu cca. 30°C). Rychlost kalení musí být taková, aby se austenitická struktura přeměnila na martenzit, plus zbytkový austenit. Pro ocel 22MnB5 je nutná rychlost odvodu tepla vyšší než 30 °C/s. Pokud by rychlost ochlazení byla pomalejší, mohlo by dojít k vytvoření jiných struktur jako je bainit, ferit či perlit. Tyto vnitřní struktury snižují požadovanou pevnost a tuhost dílu.

Průběh technologie tváření za tepla s následným kalením se dělí na dva rozdílné technologické postupy. A to na technologii výroby přímou a nepřímou metodou. V případě přímé metody materiál projde pecí a po ohřevu je umístěn do tvářecího nástroje, ve kterém je následně zakalen, viz obrázek 2.7. Princip nepřímé metody je zobrazen na obrázku 2.8 kde se nástřih nejprve předlisuje, následně se založí do pece, a po ohřevu v peci se provede zakalení ve formě.



Obr 2.7: Ukázka linky na výrobu dílů z oceli 22MnB5 – přímá metoda [6]



Obr. 2.8: Ukázka linky na výrobu dílů z oceli 22MnB5 – nepřímá metoda [6]

Nejdůležitějšími parametry pro tváření za tepla je teplota a čas. Výroba dílů z oceli 22MnB5 je rozdělena do několika po sobě jdoucích kroků. První z kroků u polotovaru vyráběného přímou metodou je, že se materiál založí do průběžné pece (délka pece cca. 30 m), kde se posouvá po keramických válečkách. Na konci pece je materiál prohřátý v celém svém objemu a jeho vnitřní feriticko-perlitická struktura se přeměnila na austenit. Materiál prochází pecí cca. 4–7 minut, na konci má teplotu okolo 850 °C.

V druhém kroku se ohřátý díl vyjme z pece a vloží se do tvářecího nástroje, kde se provede lisování a zakalení dílu. Čas na transport dílu mezi pecí a nástrojem by měl být co nejkratší, aby nedocházelo k ochlazení dílu. Proto se ohřev materiálu provádí vždy na vyšší teplotu než je požadováno, aby měl polotovar zaručenou austenitickou teplotu, která je potřebná pro tváření za tepla.

Dalším důležitým aspektem, který je potřebný brát v potaz je volba vhodné povrchové úpravy, protože používané pece pro ohřev materiálu bývají bez ochranné atmosféry. Pokud je pro tuto technologii použit plech bez povrchové úpravy, vznikají při jeho zpracování na povrchu dílu okuje, které se následně musí odstranit otryskáním. Při otryskávání se odstraňují nevhodné okuje, ale zároveň se vnáší do materiálu vnitřní pnutí, které je nežádoucí z hlediska dalšího zpracování (svařování atd.). Toto pnutí může vyvolat torzi vyrobeného dílu. Proto se v dnešním automobilovém průmyslu používají polotovary pro vysokopevnostní plechy již s ochrannými povlaky. Nejčastěji je to AlSi vrstva, která brání oxidaci povrchu při ohřevu v peci a napomáhá materiálu při tváření uvnitř nástroje.

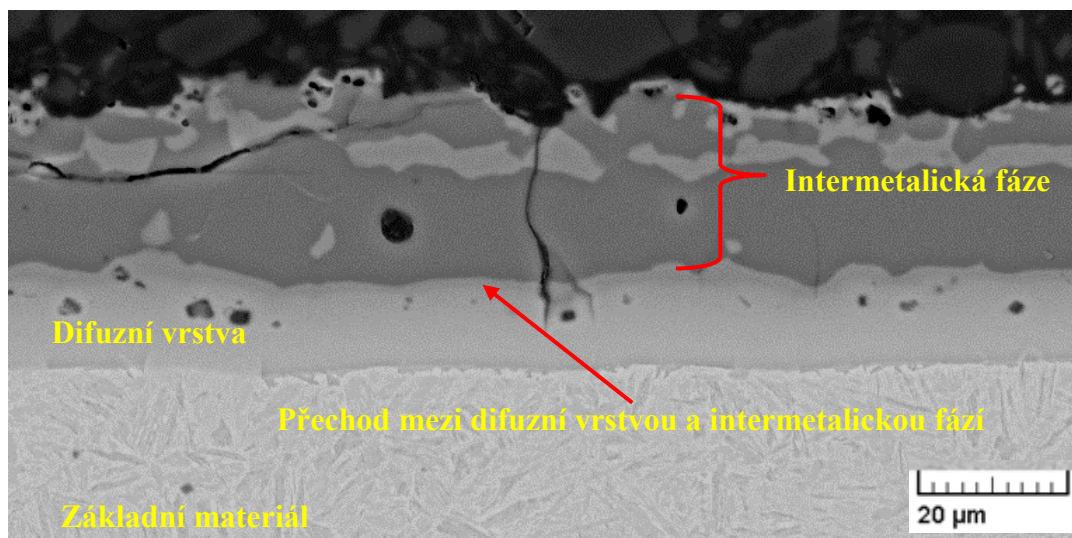
2.2.3. AlSi ochranná vrstva

AlSi ochranná vrstva slouží jako ochranná vrstva nástřihu plechu před oxidací a oduhličením během procesu tváření za tepla a to jak při ohřevu v peci, tak i během transportu plechu do tvářecího nástroje a následného tváření, kalení uvnitř formy. AlSi povlaky jsou nanášeny metodou žárového pokovení. Orientační chemické složení této vrstvy je 88 % hliníku, 10 % křemíku a 2 % železa.

Povlaky s tímto chemickým složením mají teplotu tání okolo 600 °C, která je z hlediska austenitizace materiálu nutná překročit. Během ohřevu v peci dochází k difuzi prvků ze základního materiálu do povlakové vrstvy a zase naopak. To má za následek zvyšující se obsah železa ve vrstvě, což následně vede k tvorbě slitin na bázi Al-Fe (FeAl_3 či FeAl) na rozhraní povlaku a základního materiálu. Tyto slitiny mají mnohonásobně vyšší teplotu tání, než slitina s původním chemickým složením. Vzniklé slitiny s vyšší teplotou tání se přemísťují od rozhraní povlaku se základním materiálem, směrem k povrchu povlaku, kde zabraňují jeho roztavení.

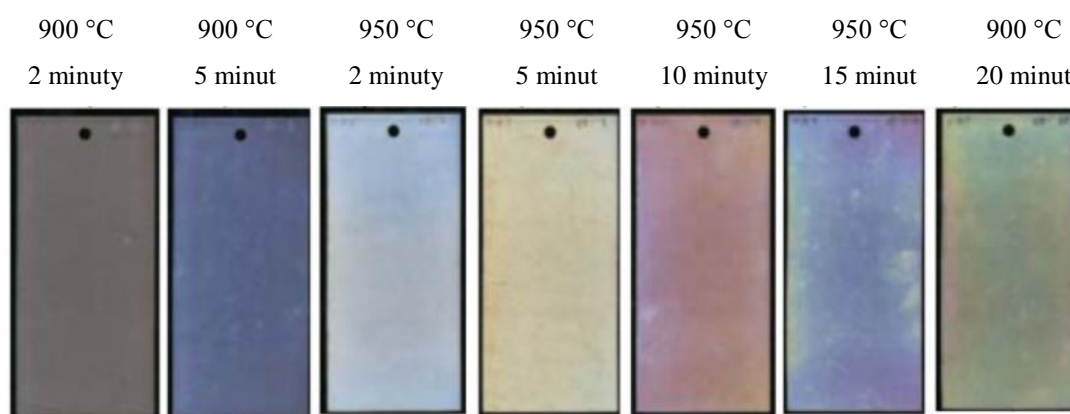
Plechý pokovené povlakem na bázi Al-Si není možné zpracovávat nepřímou metodou, je to zapříčiněno tím, že slitiny Al-Fe mají mnohem horší tvařitelnost, než má základní materiál, který má feriticko-perlitickou vnitřní strukturu.

AlSi povlaky, které se používají k ochraně nástřihů před oxidací, by měly mít tloušťku okolo 30-40 μm . Povlak není v celém průřezu homogenní, je složen z několika vrstev a to v závislosti na technologických podmínkách při jeho výrobě. Na obrázku 2.9 je zobrazen průřez AlSi povlakem po tepelném zpracování. Zde jsou viditelné jednotlivé vrstvy povlaku.



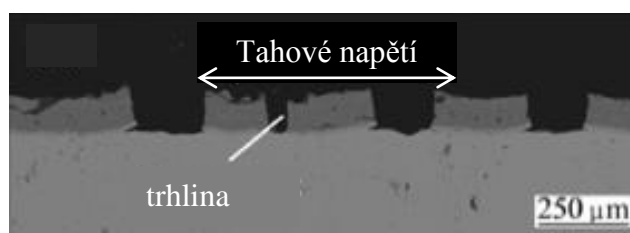
Obr. 2.9: Průřez AlSi vrstvou po tepelném zpracování

Povlak nemá v celé tloušťce homogenní chemické složení, to má za následek obtížnou svařitelnost těchto plechů. Pokud je doba austenitizace delší, dochází k narůstání tloušťky intermetalické vrstvy a k tvorbě subvrstvy, která je obohacená železem. Zároveň dochází i k nárůstu tloušťky oxidů na povrchu povlaku, což má za následek změnu barvy povrchu díky rozdílné interferenci zmiňovaných oxidů (vyšší obsahu Al v povrchové vrstvě). Díky tomu je možné posuzovat kvalitu a složení povlaku dle jeho barvy. Obrázek 2.10 ukazuje barvu povrchové vrstvy plechu v závislosti na použitém tepelném zpracování.



Obr. 2.10: Závislost barevného odstínu povrchové vrstvy na délce tepelného zpracování [7]

Při používání plechu s AlSi povlakem při tváření za tepla nastává další z problémů a to ten, že povlak má rozdílné fyzikální vlastnosti oproti základnímu materiálu. AlSi povlak je křehčí, než základní materiál, a proto není schopen při tváření dobře snášet deformace jako tvárnější základní materiál. Tento aspekt je hlavním důvodem vedoucím ke vzniku trhlin, které jsou kolmé na rozhraní povlaku se substrátem viz obrázek 2.11. Jakmile se trhliny dostanou na povrch substrátu, začnou se šířit po jeho rozhraní. Trhliny, které vznikají v povlakové vrstvě, mají za následek obnažování základního materiálu, což vede k jeho oxidaci.



Obr. 2.11: Porušení celistvosti povrchové vrstvy vlivem tahového namáhání [8]

Na vznik trhlin v povlaku zmiňovaných výše mají významný vliv dvě veličiny a to teplota ohřevu a rychlost deformace. Experimenty bylo zjištěno, že při nízké rychlosti deformace cca. 0,01 m/s se trhliny téměř nevyskytují. Ty samé experimenty byly uskutečněny i různými teplotami a bylo zjištěno, že hraniční teplotou pro vznik trhlin je teplota cca. 800 °C, při které dochází k tvorbě malých, sporadicky rozmístěných trhlin. Proto by tváření mělo být prováděno při nižší rychlosti deformace a za vysoké teploty.

2.3. Technologie lepení

Celková kvalita lepeného spoje je především závislá na čtyřech důležitějších parametrech a to, adhezi a kohezi, smáčivosti lepeného povrchu a na pevnosti lepeného materiálu:

Adheze neboli přilnavost je vzájemné přitahování dvou povrchů adhezními silami. Adheze souvisí s molekulární strukturou lepidla a lepené plochy, je výsledkem působících fyzikálních sil a mezimolekulárních i chemických vazeb.

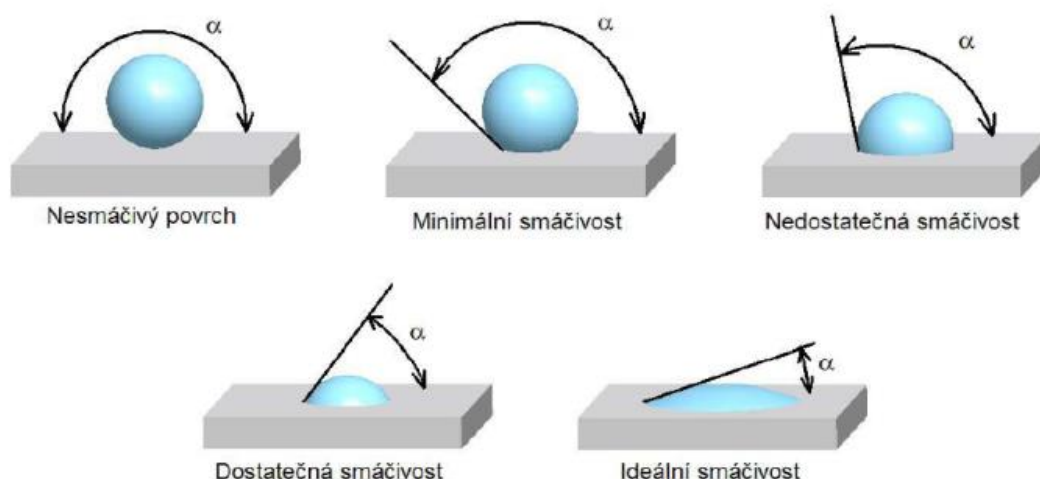
Koheze neboli soudržnost je charakteristický stav látky (lepidla), ve kterém působením mezimolekulárních a valenčních sil drží částice látky pohromadě. Velikost koheze udává tzv. kohezni energie. Tato veličina udává jak velké množství energie je potřebné k odtržení jedné částice od ostatních.

Smáčivost je schopnost kapaliny přilnout k povrchu některých pevných fází. Souvisí s povrchovou energií látek, která je vyjádřena jako povrchové napětí. Pokud je povrchové napětí kapaliny (lepidla) nižší než povrchové napětí pevného povrchu (kovu), dojde k rozlití kapaliny po povrchu.

Pevnost lepeného materiálu (plechu) musí být taková, aby nedošlo při namáhání k jeho porušení. Pokud by byla pevnost slepovaného materiálu nižší, než je kohezni vlastnost použitého lepidla, znamenalo by to, že nelze zajisti správnou kvalitu lepeného spoje.

Ale nejenom adheze, koheze, smáčivost a pevnost lepeného materiálu ovlivňuje kvalitu lepeného spoje, musí se brát v úvahu i další aspekty jako je vhodná konstrukce spoje, vhodná kombinace použitého lepidla a materiálů, které mají být slepeny a v neposlední řadě musí být zachován správný technologický postup výroby lepeného spoje.

Na obrázku 2.12 jsou ukázána kapková zkouška smáčivosti, která určuje, zda je materiál smáčivý či nikoliv.



Obr. 2.12: Kapková zkouška smáčivosti [9]

2.3.1. Postup technologie lepení:

Výrobní postup lepeného spoje se dá rozdělit na čtyři základní fáze:

- a) příprava spojovaných materiálů na lepení
- b) příprava lepidla
- c) nanesení lepidla
- d) montáž spoje

a) Příprava spojovaných materiálů na lepení

Hlavním činitelem je smáčivost lepeného materiálu lepidlem. Proto je velmi důležité upravit slepovaný povrch tak, aby smáčivost povrchu a lepidla byla co největší. Mezi základní úpravy povrchu před lepením patří mechanické a chemické způsoby. Z mechanických je to například obrábění, broušení, tryskání kartáčování a z chemických odmaštění, moření, fosfatizace atd..

b) příprava lepidla

Způsoby přípravy lepidel závisí na čtyřech základních faktorech:

- druhu lepidla – jeho chemická struktura, počet složek atd.
- stavu lepidla po uskladnění – doba životnosti lepidla
- způsobu nanášení – velikost a tvar lepených součástí
- způsobu vytvrzování – teplota a tlak vytvrzování

c) Nanášení lepidla

Nanášení lepidla je mezifáze, která odděluje přípravné operace od vlastního vytvoření lepeného spoje. Snahou je vytvořit nanesením lepidla souvislou rovnoměrnou vrstvu, určité tloušťky.

d) montáž spoje

K tomu aby byl vytvořen pevný spoj je nutné pomocí vhodných přípravků lepené díly předepsaným tlakem k sobě zafixovat. Díky tomu se vytvoří fyzikální a chemické podmínky pro vznik pevných vazeb, dokud nedojde k vytvoření adhezního spojení.

2.4. Základní teorie lepení

Teorie lepení (adhezní spojování dílů) se opírá o vztahy molekul a jejich vzájemného působení. Podle nejnovějších zjištění je sem třeba přiřadit i vztahy vyplývající z nadmolekulární struktury. S molekulovou strukturou souvisí adheze. Při tom se budou dále uplatňovat fyzikální síly, chemické vazby a mezimolekulární síly. V současné době se nejčastěji citují následující teorie adheze:

- molekulová teorie
- elektrostastická teorie
- mechanická teorie
- difuzní teorie
- chemická teorie

1) Molekulová teorie (adsorpční)

Dnes nejvíce přijímaná adsorpční teorie adheze vychází z analogie jevu smáčení, adsorpce a adheze. Základem adheze je vzájemné působení molekul lepeného materiálu (adherendu) a lepidla (adheziva), proto je nevyhnutelné, aby oba druhy molekul měly polární funkční skupiny a byly tak schopné vzájemného působení. Proces vzniku adhezního spoje lze rozdělit na dvě stadia: 1. - transport molekul adheziva k povrchu adherendu; 2. - vzájemné působení mezimolekulárních sil (Van der Waalsovy) po přiblížení molekul adheziva na vzdálenost menší než 0,5 nm. To trvá až do dosažení adsorpční rovnováhy. Za předpokladu dostatečného kontaktu (na molekulární úrovni) adherendu a adheziva postačují Van der Walsovy síly vzhledem ke své vysoké četnosti k dobré pevnosti adhezního spojení. Příčina malé pevnosti ad-

hezního spoje je spatřována především v omezeném kontaktu adherendu a adheziva, a proto úzce souvisí s dokonalostí smáčení povrchu adherendu adhezivem.[10]

2) Elektrostatická teorie

Tato teorie předpokládá dvojitou vrstvu vytvořenou dotykem dvou rozličných substancí ve spoji jako základ pro vznik adheze. Podle toho je spoj kondenzátorem, ke kterému se rozdílně nabitě desky přitahují. Jakmile je oddělíme, vzniklý potenciálový rozdíl se musí vybit nebo vyzářit jako elektronová emise. Při podrobnějších studiích však nebyla prokázána korelace mezi velikostí povrchového elektrostatického náboje a pevností odpovídajících adhezních spojení.[10]

3) Mechanická teorie

Tato teorie vychází z představy, že po proniknutí kapalného adheziva do trhlin a kavit lepeného povrchu, dojde po zatuhnutí adheziva k jeho „zaklínění“ v povrchu adherendu. Mechanické teorie adheze jsou dnes užívány sporadicky jen ve specifických případech, jako je např. adheze pryžových směsí k textilním vláknům či výroba překližek.[10]

4) Difuzní teorie

Podle této teorie pevnost spoje vzniká vzájemnou difuzí polymerů (nebo jiných materiálů) napříč rozhraním. Základem tohoto tvrzení je skutečnost, že některé látky (např. polymery) mohou navzájem difundovat a průběh této difuze, který závisí především na čase, teplotě, viskozitě, kompatibilitě adherendu a adheziva, relativní molekulové hmotnosti polymerů, ovlivňuje pevnost spoje. Tato teorie však nevysvětluje možnost spojení materiálů, které vzájemně nedifundují, ale úspěšně se lepí (např. kov-sklo). [10]

5) Chemická teorie

Pro získání pevného spoje, který nebude vykazovat adhezivní, ale kohezní lom je podle této teorie potřebné, aby materiály, které se mají navzájem spojit, reagovaly vytvořením primárních chemických (kovalentních) vazeb napříč rozhraním. Takovéto vazby sice někdy vznikají, všeobecně však lepení probíhá v termodynamických podmínkách, které vznik chemických vazeb neumožňují. Pokud by tyto

vazby vznikly, nelze jednoznačně tvrdit, že zvyšují pevnost spoje, neboť snahy zavést do adheziv či adherendů reakce schopné funkční skupiny často nevedly ke zlepšení vlastností adhezního spoje.[10]

2.4.1 Rozdělení lepidel

V technické praxi se lepidla rozdělují podle několika hledisek. Nejobecnějším základem pro rozdělení lepidel je jejich chemické složení. Podle původu základní složky se dělí lepidla na přírodní a syntetická. Přírodní se dělí nejčastěji na organická (živ. nebo rostl. původ, škrob, živ. kůže apod.) a anorganická (vodní sklo, sádra, cement atd.). Syntetická dále na lepidla na bázi reaktoplastů, termoplastická, elastomerová (kaučukovitá) a směsná.

Podle fyzikálního charakteru na lepidla pevná, polopevná a tekutá. Tekutá se dělí dále na roztoková, disperzní, pasty a pěny. Dále je možné u reaktivních lepidel využít pro rozdělení typ reakce, který je potřebný pro vytvrzení lepidla.[10]

2.5. Proces lepení při stavbě karoserie automobilu

Při stavbě karoserie se nejčastěji používají kaučuková lepidla pro spojení a utěsnění povrchu plechů s výztuhami. Epoxidy a jejich směsi se používají pro pevnostní spoje na celé karoserii. K vytvrzování všech lepidel na karoserii automobilu dochází při operaci sušení KTL ochranné vrstvy v lakovně a to při teplotě cca 180 °C po dobu cca 20 minut.

Při výběru lepidel je možné vybírat z velkého množství základních pryskyřic, které se dají různými způsoby modifikovat. Epoxidová lepidla mají velkou škálu užitečných vlastností a pro svou pevnost se používají jako podpůrné prostředky pro získání celkové tuhosti karoserie automobilu.

Hlavní složkou, podle které epoxidy rozdělujeme, je kromě samotného druhu epoxidu, také použité tvrdidlo. Jestliže tvrdidlo reaguje s pryskyřicí již při pokojové teplotě, musí být tvrdidlo dodáváno odděleně od pryskyřice. Takový systém se nazývá dvousložkový a při jejich směšování musíme dbát pokynů výrobce. Pokud tvrdidlo reaguje s pryskyřicí pouze za zvýšené teploty, může být rozmícháno či rozpuštěno v pryskyřici. Tyto systémy se nazývají jednosložkové a dávají se bez nutnosti směšování.

Podle použití těchto lepidel je nutno brát v potaz jejich chemické a fyzikální vlastnosti. Díky vysoké viskozitě všech používaných lepidel je potřeba tlakového

nanášecího zařízení. Toto zařízení musí být schopné dostatečnou rychlostí nanášet i větší množství lepidla. Dále pak musí dostatečnou rychlostí probíhat vytvrzování a to při teplotách okolo 180 °C. Další určující vlastnosti lepidla je snášenlivost s oleji na povrchu kovu určených k lepení, vysoká viskozita a modul pružnosti i při nízkých teplotách.

Jednou ze zvláštních úprav ve svařovně je předtvrzení, tzv. želatinace. Je to proces, při kterém dochází k homogenizaci materiálu a k částečnému zreagování lepidla při teplotě 160–180 °C po dobu 15–20 s. Takto upravené lepidlo má vyšší viskozitu a mez toku. Díky této úpravě se pak lepidlo v lakovně nevymývá a neznečišťuje lázně předúprav karoserií. A zároveň poskytuje tuhost pro přepravu karoserie mezi svařovnou a lakovnou.

Epoxidová lepidla se využívají hlavně kvůli výborné pevnosti, přilnavosti, vysoké teplotě skelného přechodu, stabilitě a možností použití na mastné povrchy. Ale ne všechny vlastnosti epoxidových lepidel jsou dostačující. Například rázová houževnatost pryskyřic dianového typu bez jakýchkoliv přísad je velmi nízká a to už při teplotě 20 °C. Proto je důležité přidávat do pryskyřic flexibilizační přídavky, které sníží křehkost pryskyřice. Existují dva základní druhy změkčování materiálu:

- vnitřní změkčování
- vnější změkčování

Pro vnitřní změkčování se volí takové molekuly, které mají vhodnou funkční skupinu a mohou reagovat s epoxidovou pryskyřicí nebo tvrdidlem lepidla. Princip vnitřního změkčování spočívá v oddálení větvících reakčních skupin. Díky tomu se prodlouží lineární části řetězce nebo se sníží funkčnost tvrdidla. Kvůli chemické vazbě mezi použitým flexibilizátorem, pryskyřicí nebo tvrdidlem nemůže dojít k jeho následnému vylučování.

Pro vnější změkčování se do lepidel přidávají látky, které objemné molekuly a vysoký bod varu. Po vytvrzení zůstane změkčovadlo uzavřené v síti pryskyřice a při mechanickém zatížení materiálu tlumí působení vnějších sil. U vnějšího změkčování mezi sebou nereaguje změkčovadlo s pryskyřicí. Nejsou tedy spolu nějak chemicky vázány a díky tomu se změkčovadlo může ze spoje tzv. vypotit. Kdy dochází během životnosti ke změně v materiálu lepidla.

2.5.1. Lepidla pro lepení karosérií automobilů

Potřeba produktivity výroby je zvláště v automobilovém průmyslu velmi vysoká, není z tohoto důvodu výhodné před aplikací lepidla nebo svařováním při stavbě karoserie plech zvlášť odmašťovat a ani v praxi se tak nečiní. Okruh použitelných lepidel se tedy zužuje na lepidla, která jsou vůči mazivům málo citlivá a zajišťují dostatečnou adhezi i pevnost spoje navzdory určité tloušťce povrchové vrstvy mazi-
va.

Plechý dodávané z hutí jsou proti korozi chráněny konzervačním mazivem, které by mělo mít pro daný povrch i dobré technologické vlastnosti. Množství mazi-
va se běžně pohybuje v rozmezí 1 až 3 g.m⁻². V některých případech je nutné před vlastním lisováním ke zlepšení tribologických vlastností na povrch plechu místně nanášet různá technologická maziva (dle technologické náročnosti a požadované kvality povrchu výrobku).

Výztuhová lepidla se vytvrzují v průběhu vytvrzování laku karoserie. Pro lemová lepidla se v případě kaučuků efektivně využívá rychlé částečné vytvrzení pomocí indukčního ohřevu v průběhu montáže a celkové vytvrzení lepidla je dokončeno při vytvrzování laku karoserie v peci.

Charakter a složení lepidel používaných pro stavbu karosérií je velmi úzce spjat s požadovanou funkcí spoje. Takto lze lepidla rozdělit na lepidla pro účely těsnění, výztuhová a pevnostní. Báze lepidel a charakter lepeného spoje pro jednotlivé aplikace ukazuje tab. 1.

Tab. 1: Aplikace a funkce lepidla při výrobě karoserie automobilu [10]

Druh lepeného spoje	Příklad použití	Používaná lepidla	Požadované vlastnosti lepeného spoje
Drážkové přírubové lepení	Kapota	Epoxidové pryskyřice	Pevnost, tuhost, ochrana před šterbinovou korozí
Výztuhové lepení	Dveře, kapota	Polyuretany, PVC, syntetické kaučuky	Neohebnost, nesmí deformovat pohledový díl
Lepení nosné struktury	Sloupky, profily, přírubové švy	Epoxidová pryskyřice	Pevnost, tuhost
Těsné lepení	Hrdlo nádrže, utěsnění švu	Syntetické kaučuky, PVC	Těsnost, odolnost vůči korozi
Přímé zasklívání	Přední, zadní a pevné boční skla	Polyuretany	Tuhost karoserie, těsnost, nepropustnost

Technologie lepení nachází při hrubé stavbě karoserie stále širší uplatnění vzhledem k požadavkům na snižování hmotnosti karoserie (vede k úsporám pohonných hmot). Nižší energetická náročnost lepení, v porovnání se svařováním, je též faktorem pro zvyšování podílu lepených spojů ve stavbě karoserií automobilů.[10]

2.6. Hodnocení vlastností lepidel

2.6.1. Zkouška pevnosti lepených spojů v odlupování (dle ISO 11339)

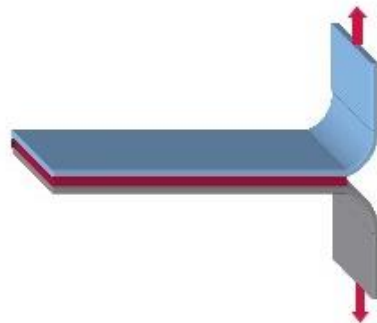
Cílem zkoušky je zjištění střední odlupovací pevnosti, viz rovnice 2.1, a určení typu porušení lepeného spoje. Průběh zkoušky je takový, že zatěžování lepeného spoje působí ve směru kolmém na lepenou plochu. Rozměry vzorku jsou 200 mm x 5 mm a plocha slepeného spoje je 150 mm x 25 mm. Tloušťka nanesené vrstvy lepidla závisí na použitém druhu lepidla. Pro konstrukční lepidlo je to 0,2 mm a pro výplňové 2 mm. Rychlost zatěžování při zkoušce je 100 mm/min.

$$\sigma_s = \frac{F}{b} \text{ [MPa]} \quad (2.1)$$

σ_s - pevnost v odlupu [MPa]

F - zatěžující síla [N]

b - šířka vzorku [mm]



Obr. 2.13: Zkušební vzorek [11]

2.6.2. Zkouška pevnosti ve smyku při zatěžování tahem (dle normy PV 12.35)

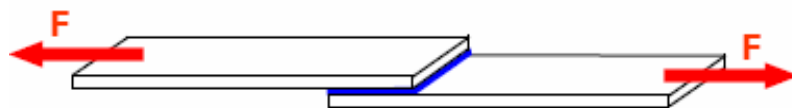
Cílem zkoušky je zatížení lepeného spoje tahovým namáháním, viz obrázek 2.14. Výsledkem zkoušky je pevnost v tahu zkoušeného spoje a druh porušení zkušebního vzorku. Rozměry vzorků jsou 150 mm x 25 mm, velikost přeplátování a tloušťka vrstvy lepidla závisí na druhu použitého lepidla. Pro konstrukční lepidla je přeplátování 10 mm a tloušťka lepidla 0,2 mm, u výplňových je 16 mm přeplátování a 2 mm tloušťka lepidla.

$$\tau_{max} = \frac{F}{S} \text{ [MPa]} \quad (2.2)$$

τ_{max} – pevnost ve smyku [MPa]

F – zatěžující síla [N]

S – plocha vzorku [mm²]



Obr. 2.14: Ukázka zkušební vzorku [12]

2.6.3. Dynamická odolností slepů vůči porušení rázem (dle ISO 11343)

Jedná se o dynamickou zkoušku, při které je zkušební vzorek zkoušen ocelovým kladivem. Vzorek se skládá ze dvou tvarově totožných tělísek o rozměrech 20 mm x 90 mm, kdy slepená plocha zkušebních vzorků je definovaná normou na 20 mm x 30 mm. Rychlost ocelového kladiva při zkoušce je od 2 m/s do 6 m/s. Na obrázku 2.15 je znázorněn princip zkoušky.

Zkouška se provádí se dvěma typy zkušebního klínu:

- 1) Symetrický klín – určený pro vzorky z ohebných substrátů
- 2) Nesymetrický klín – určený pro různé kombinace substrátů

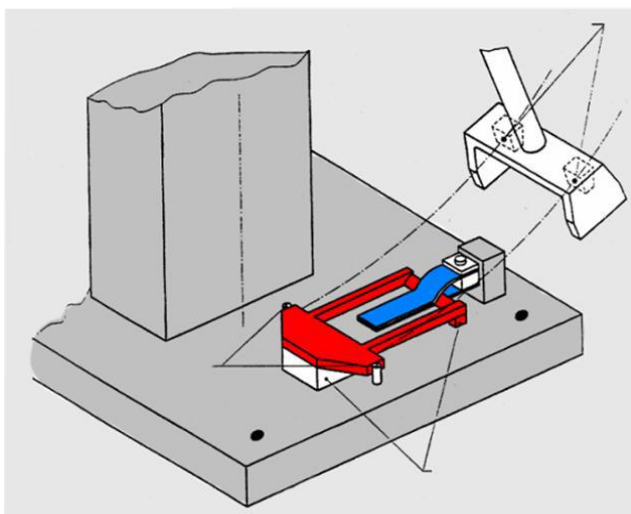
Výsledky jsou střední hodnoty pevnosti, energie potřebná s porušení spoje a typ porušení

$$P_s = \frac{F}{b} \text{ [MPa]} \quad (2.3)$$

P_s – střední hodnota pevnosti [MPa]

F – zatěžující síla [N]

b – šířka vzorku [mm]



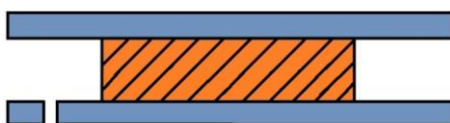
Obr. 2.15: Ukázka průběhu zkoušky [12]

2.7. Vyhodnocení typu porušení lepeného spoje (dle ISO 10365)

Při vyhodnocování mechanických vlastností lepidla nestačí pouze informace o tom, jak velkou působící sílu daný spoj vydržel, ale je také velmi důležité k jakému typu porušení spoje došlo. Proto jsou v normě ISO 10365 uvedeny základní druhy porušení lepeného spoje:

2.7.1. Porušení závislá na substrátu

1. Porušení celistvosti jednoho nebo obou substrátů – SF, viz obrázek 2.16



Obr. 2.16: Typ porušení celistvosti substrátu [13]

2. Kohezní porušení substrátu – CSF

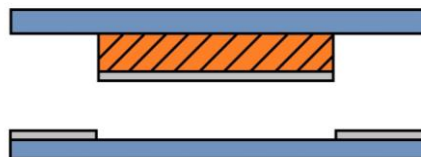
- u toho druhu porušení dochází k vytržení materiálu substrátu, viz obrázek 2.17



Obr. 2.17: Typ kohezního porušení substrátu [13]

3. Delaminační porušení – DF

- porušení spoje nastává na rozhraní ochranného povlaku a základního materiálu. Porušení je zobrazeno na obrázku 2.18.



Obr. 2.18: Typ delaminačního porušení [13]

2.7.2. Porušení závislá na lepidle

1) Adhezní lom – AF

- při tomto druhu porušení zůstává lepidlo na jedné části vzorku a druhá část vzorku je čistá bez známek lepidla, viz obrázek 2.19. K porušení tedy dochází na rozhraní mezi substrátem a lepidlem. Tento druh porušení slepeného spoje je nežádoucí, ale toleruje se maximálně na 20 % plochy spoje.



Obr. 2.19: Typy adhezních lomů [13]

2) Kohezní lom na hranici substrátu - SCF

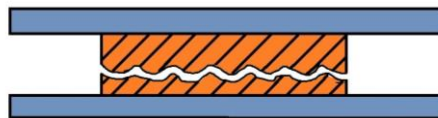
- u tohoto druhu porušení opět porucha prochází rozhraním mezi lepidlem a substrátem, ale v tomto případě lepidlo zůstává na obou stranách porušeného vzorku, viz obrázek 2.20.



Obr. 2.20: Typy kohezních lomů po hranici substrátu [13]

3) Kohezní lom – CF

- porucha prochází rovnoměrně strukturou vrstvy lepidla. Na obou porušených částích vzorku je přibližně stejně tlustá vrstva lepidla. Charakter porušení zobrazen na obrázku 2.21.



Obr. 2.21: Kohezní lom [13]

3. Experimentální část

3.1. Úvod k experimentální části

V experimentální části byla dle požadavku zadání provedena řada analýz a zkoušek na materiálech, které jsou používány k výrobě karoserie automobilu. Cílem experimentu je porovnání povrchové ochranné vrstvy materiálu, v závislosti na době ohřevu materiálu v peci při tepelném zpracování a následný vliv této vrstvy na pevnost lepeného spoje.

Experiment byl rozdělen do tří hlavních na sebe navazujících etap analýz. Kdy v první etapě byla analyzována ochranná povrchová vrstva materiálu 22MnB5. Ochranná vrstva byla analyzována pomocí elektronové a optické mikroskopie. Hodnocení ochranné vrstvy bylo provedeno dle normy TL 4225, ve které je řešena problematika vysokopevnostních ocelí různými druhy povlaku. V druhé etapě následovaly zkoušky smykové pevnosti lepeného spoje, které byly provedeny dle normy PV 12.35. V této části bylo provedeno i vyhodnocení způsobu porušení lepených spojů, které provedeno dle normy ISO 10365. Ve třetí etapě byly lepené vzorky zkoušeny dynamicky s rychlostí zkoušky 15 m/s, vzniklé lomové plochy bylo opět vyhodnoceny dle normy ISO 10365. Proto, aby byl výsledek vyhodnocení lomové plochy dle ISO 10365 co nejpřesnější a pro potvrzení, že se jedná o předpokládaný typ porušení, byly lomové plochy vzorku zkoušených v druhé a třetí etapě analýz dále analyzovány pomocí elektronové a optické mikroskopie.

Zkoušky dle normy PV 12.35 byly provedeny při teplotách 23 °C (RT), - 35°C a +80 °C. Dynamická zkouška byla provedena za teploty 23 °C (RT).

3.2. Použitý substrát a lepidla

1) Materiál substrátu

Jako substrátu byl použit materiál 22MnB5 tloušťky 1,2mm se žárově nanesenou povrchovou ochrannou vrstvou AlSi o tloušťce 79 g/m², čemuž odpovídá označení materiálu AS 150. Tento materiál byl následně tepelně zpracován. Chemické složení použitého substrátu a mechanické vlastnosti materiálu před tepelným zpracováním jsou obsaženy v tabulkách 2, 3 a 5. Mechanické vlastnosti materiálu po tepelné zpracování jsou uvedeny v tabulkách 4 a 6. Hodnoty mechanických vlastnos-

tí použitého substrátu před i po tepelném zpracování byly zjištěny provedením tahové zkoušky podle normy ČSN EN ISO 6892 - 1, která byla provedena pomocí zkušebního zařízení Zwick Z250 a vyhodnocovacího softwaru Zwick test Expert. Chemické složení základního materiálu bylo převzato z dodacího atestu materiálu od dodavatele.

V tabulkách 3, 4, 5 a 6 jsou uvedeny průměrné naměřené hodnoty mechanických vlastností materiálu před i po tepelném zpracování získaných z 5 zkušebních vzorků pro každý teplotní interval.

Tab. 2 Chemické složení použitého substrátu [%]

C	Si	Mn	P	S	Al	B	Cr	Cu	Mo	Nb	Ti
0,201	0,226	1,13	0,01	0,0005	0,033	0,002	0,187	0,011	0,001	0,001	0,034

Tab. 3 Mechanické vlastnosti substrátu před TZ

$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80mm} [%]
$377,4 \pm 9,4$	$542,4 \pm 10,1$	$14,4 \pm 0,9$

Tab. 4: Mechanické vlastnosti substrátu po TZ

Doba TZ [min.]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80mm} [%]
8	$907,0 \pm 122,9$	$1368,0 \pm 10,2$	$2,9 \pm 2,8$
12	$1030,0 \pm 52,9$	$1366,0 \pm 18,5$	$2,0 \pm 0,4$
16	$994,0 \pm 46,0$	$1386,0 \pm 10,2$	$2,6 \pm 0,2$

Tloušťka substrátu byla 1,2 mm

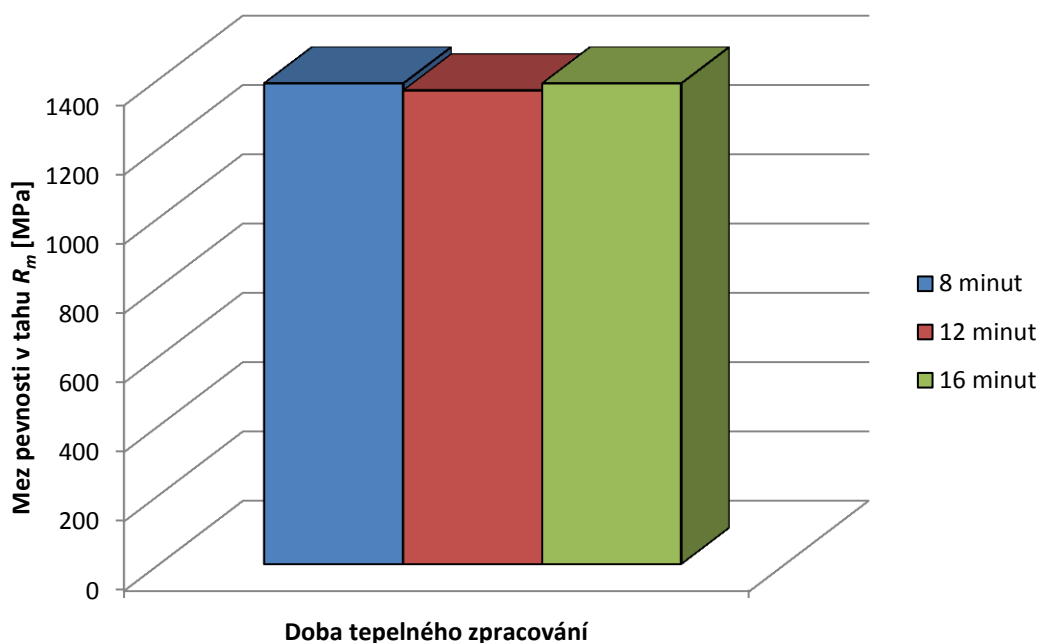
Tab. 5: Měření tvrdosti substrátu před TZ

Metoda	HV 10
Naměřeno	$173,0 \pm 3,5$

Tab. 6: Měření tvrdosti substrátu po TZ

Metoda	Doba TZ	HV 10
Naměřeno	8 minut	$478,0 \pm 3,5$
	12 minut	$477,0 \pm 3,5$
	16 minut	$476,0 \pm 3,5$

V grafu 1 je přehledně ukázáno, že se mez pevnosti v tahu použitého plechu s delší dobou ohřevu materiálu v peci výrazně nemění. Mezi TZ 8 a 12 minut je rozdíl 0,15 %, u TZ 16 minut je rozdíl cca. 1,38 % oproti TZ 8 a 12 minut.



Graf 1: Závislost meze pevnosti v tahu R_m na době tepelného zpracování

2) Lepidla

Pro experiment byla použita dvě epoxidová lepidla. Prvním lepidlem bylo lepidlo Sikapower 492G od firmy Sika, druhým lepidlem bylo lepidlo Betamate 1440G od firmy Dow Automotive. Hodnoty vlastností lepidel jsou uvedeny v tabulkách 7 a 8. Byly převzaty z technických listů použitých lepidel.

a) Sikapower 492G

Tab. 7: Vlastnosti použitého epoxidového lepidla

Vlastnosti	
Hustota	1300 kg/m ³
Viskozita (50 °C, 5Hz, P/P 25mm, 1mm gap CQP584-1)	cca. 1000 Pa.s
Barva	černá
Doba a čas vytvrzování	20 min / 175 °C
Pevnost ve smyku (dle DIN EN 1465)	30 MPa

b) Betamate 1440G

Tab. 8: Vlastnosti použitého epoxidového lepidla

Vlastnosti	
Hustota	1240 kg/m ³
Viskozita (50 °C, 5Hz, P/P 25mm, 1mm gap CQP584-1)	cca. 46 Pa.s
Barva	zeleno-modrá
Doba a čas vytvrzování	30 min / 180 °C
Pevnost ve smyku (dle DIN EN 1465)	29,6 MPa

3.3. Analýza povrchové vrstvy

Vzorky pro analýzu povrchové vrstvy byly připraveny ze svitku před tepelným zpracováním, který byl nastříhán na desky o rozměrech 300x300x1,2mm. Z těchto plechových desek byly zhotoveny na hydraulických stříhacích nůžkách vzorky o rozměrech 150x25x1,2mm pro zkoušku dle normy PV 12.35 (statickou zkoušku) a vzorky o rozměrech 45x25x1,2mm (dynamickou zkoušku).

Takto připravené vzorky byly zakládány do elektrické pece, která byla předehřata na teplotu 900°C. V peci vzorky setrvaly 8, 12 a 16 minut, aby došlo k jejich prohřátí na austenitizační teplotu. Následně byly vzorky vyjmuty z pece a zakaleny. Kalení bylo prováděno pomocí dvou ocelových desek, které svou velikostí zabezpečily dostatečně rychlý odvod tepla, aby měli hotové vzorky srovnatelné mechanické vlastnosti s předpisem normy TL 4225.

Povrchová vrstva vzorků byla analyzována trojím způsobem:

1) Rastrovací elektronový mikroskop – REM TESCAN Vega XMU

Tento způsob analýzy je velice výhodný, protože REM dosahuje vysokých rozlišovacích schopností, velké hloubky ostrosti a velkého zvětšení. Vzorky nemusejí být velikostně upravovány tak, aby je bylo možné vložit do vakuové komory, bez které elektronový mikroskop nemůže fungovat. Pracuje totiž v různých úrovních vakua.

Nevýhodou je, že analyzované vzorky musejí být vodivé. Pokud jsou vzorky nevodivé, je nutné jejich pokovení před samotnou analýzou. Nejčastější způsob pokovení je pomocí plazmového výboje, při kterém je na povrch vzorku nanášena vrstvička zlata, která jej učiní vodivým.

REM může mít celou řadu příslušenství, nejčastěji je doplněn o EDX chemickou analýzu, která je schopna na základě detekce charakteristického rentgenového záření vydávaného chemickým prvkem určit, o jaký prvek se jedná.

Elektronový mikroskop nepracuje se světelným paprskem, díky tomu není limitován jeho vlnovou délkou, a proto je možné mnohonásobně větší zvětšení, než je tomu u optických mikroskopů. Ukázka REM TESCAN Vega XMU na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Rastrovací elektronový mikroskop Tescan Vega XMU[14]

2) Konfokální laserový rastrovací mikroskop – OLYMPUS LEXT OLS 3000

Konfokální laserový rastrovací mikroskop Olympus LEXT OLS 3000, viz obrázek 3.2, umožňuje submikronové zobrazení povrchu materiálu a současně s nestandardním rozlišením je schopen přesného 3D měření. Díky velkému rozsahu zvětšení se tento typ mikroskopu pohybuje na rozhraní mezi optickým světelným mikroskopem a rastrovacím elektronovým mikroskopem. Velkou výhodou je že při analýze vzorků není nutno vzorek umisťovat do vakuové komory či ho pokovovat pokud je vzorek nevodivý.

Konfokální mikroskop Lext OLS 3000 využívá laserový paprsek s optickými prvky uzpůsobenými pro krátkou vlnovou délku, tak aby se optimalizovala zobrazovací schopnost a omezily se tak případné odchylky. Základním principem rastrovacího mikroskopu je to, že vytvoří obraz vcelku najednou, jako je to v případě optického mikroskopu, ale bod po bodu řádkováním. Touto technologií jsou snímány optické řezy v rovině X-Y a díky přesně definovanému posuvu objektu v ose Z, i jednotlivé optické řezy. Díky této technologii zobrazování jsou snímky z konfokálního mikroskopu vždy zaostřené a je možné skládání 3D obrazů, které vychází z možnosti postupného snímání a skládání desítek až stovek optických řezů v ose Z.



Obr. 3.2: Konfokální laserový rastrovací mikroskop Olympus Lext OLS 3000 [12]

3) Optický metalografický mikroskop – OLYMPUS GX71

Metalografický mikroskop Olympus GX 71 je optický mikroskop, který pro zobrazení používá odražené světlo. Mikroskop je vybaven digitálním fotoaparátem pro dokumentaci zkušebních vzorků. Tento model byl vybaven motorizovaným polohovacím stolcem, který se ovládal pomocí joysticku. Rozsah zvětšení se pohybuje od 25x až do 1000x. Okulár má konstantní zvětšení 10x, výměnné objektivy, které jsou umístěny na revolverové hlavě, mají zvětšení 2.5x, 10x, 20x, 50x, 100x. Lze jím pozorovat struktury materiálů, vyhodnocovat pórovitost atd. Tyto možnosti využití závisí na používaném softwaru. Metalografický mikroskop Olympus GX ukázán na obrázku 3.3.



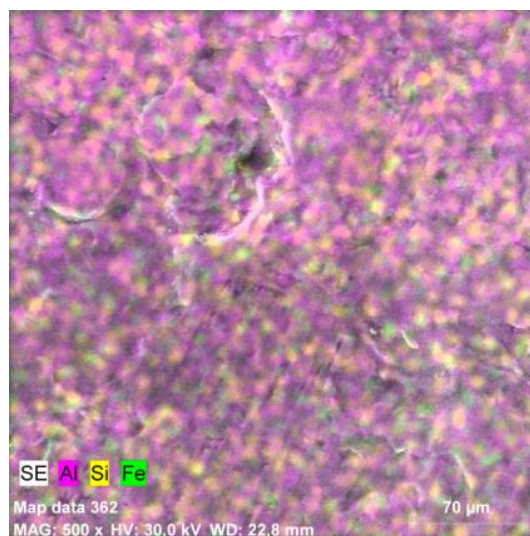
Obr. 3.3: Metalografický mikroskop Olympus GX 71[13]

3.3.1. Analýza povrchové vrstvy AlSi

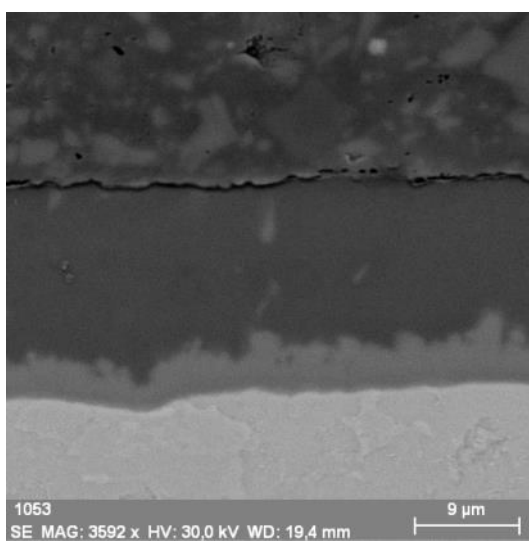
1) Povrchová AlSi vrstva před tepelným zpracováním



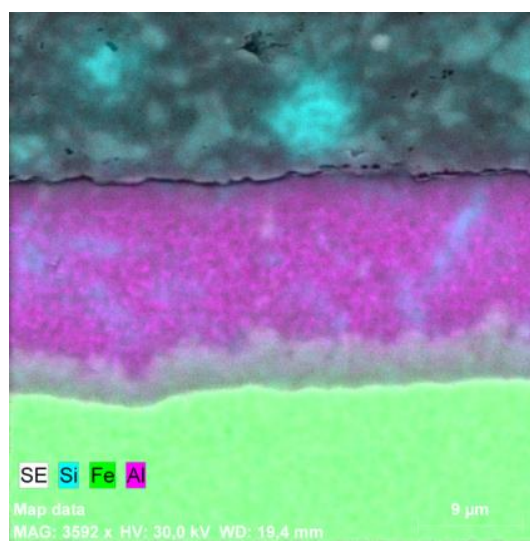
Obr. 3.4: Povrch AlSi povlaku, REM, zv. 500x



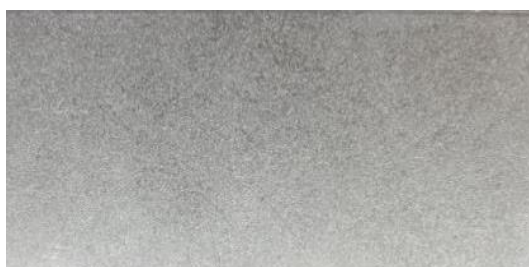
Obr. 3.5: Chemické složení AlSi povlaku



Obr. 3.6: Příčný řez materiálem, REM, zv. 3500x



Obr. 3.7: Chemické složení - příčný řez, zv. 3500x



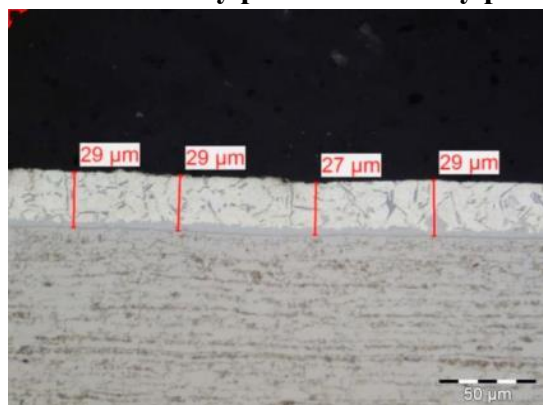
Obr. 3.8: Barevný odstín vzorku po TZ

Chemické spektrum povrchové vrstvy:

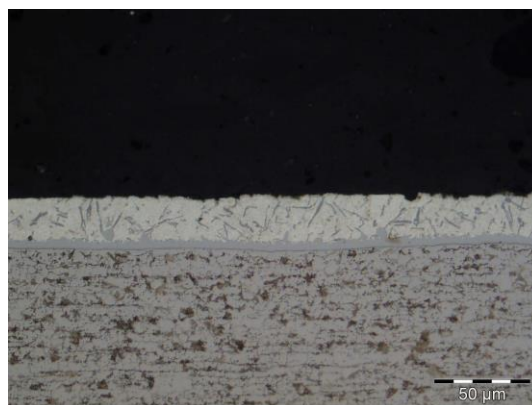
- Al 87,73 hm. %
- Si 10,31 hm. %
- Fe 1,96 hm. %

Z obrázků 3.4 a 3.6 je viditelné, že povrchová vrstva je před tepelným zpracováním homogenní bez mikroprasklin. Chemickou analýzou (obrázek 3.5 a 3.7) bylo zjištěno že se vrstva skládá převážně z hliníku a křemíku. Stopový obsah železa se zde nachází pravděpodobně ze základního materiálu. Obrázek 3.8 ukazuje barvu povlaku před tepelným zpracováním. Na obrázku 3.9 je zobrazena metodika měření tloušťky vrstvy AlSi povlaku před TZ. Obrázek 3.10 ukazuje AlSi povlak a vnitřní strukturu materiálu.

Měření tloušťky povrchové vrstvy před TZ



Obr. 3.9: Měření tloušťky povrchové vrstvy, zv. 500x

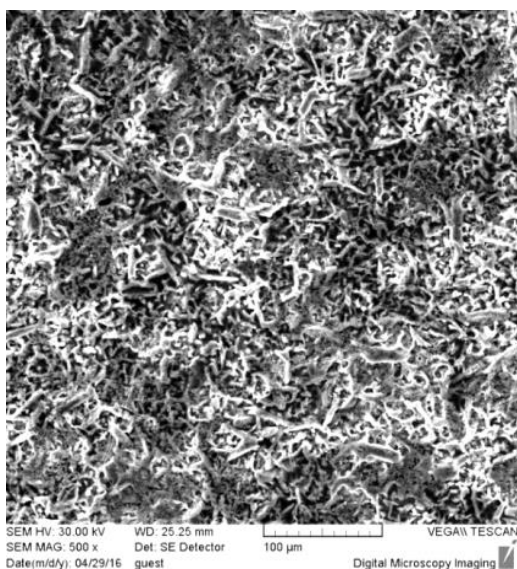


Obr. 3.10: AlSi povlak + vnitřní struktura materiálu, zv. 500x

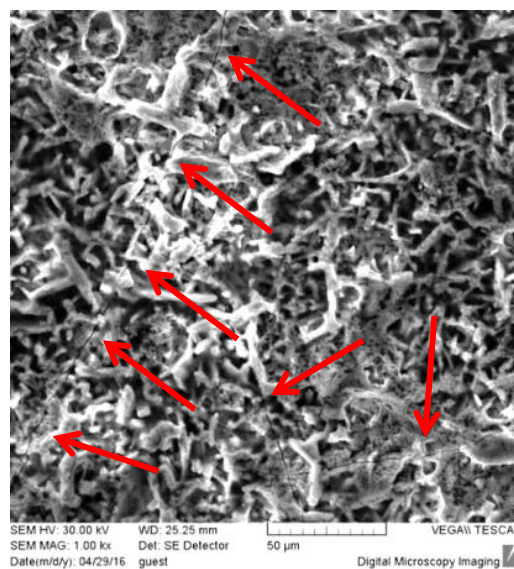
Tloušťka povrchové vrstvy se pohybuje od 24 μm do 30 μm .

2) Povrchová AlSi vrstva po tepelném zpracování

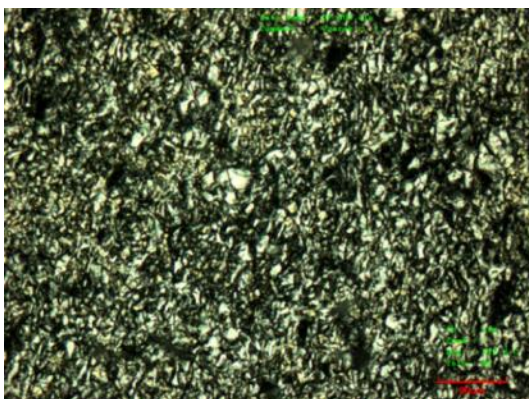
a) Doba tepelného zpracování 8 minut



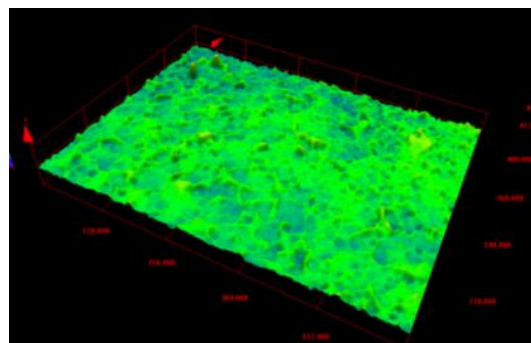
Obr. 3.11: Povrch AlSi povlaku, REM, zv.500x



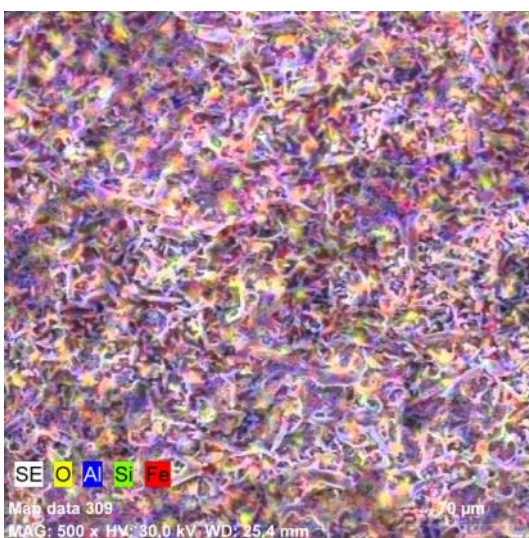
Obr. 3.12: Mikrotrhliny na povrchu AlSi povlaku, REM, zv. 1000x



Obr. 3.13: Povrch AlSi povlaku



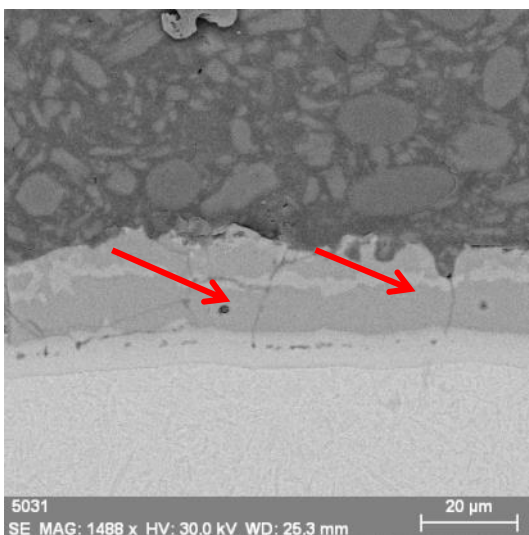
Obr. 3.14: Morfologie povrchu AlSi povlaku



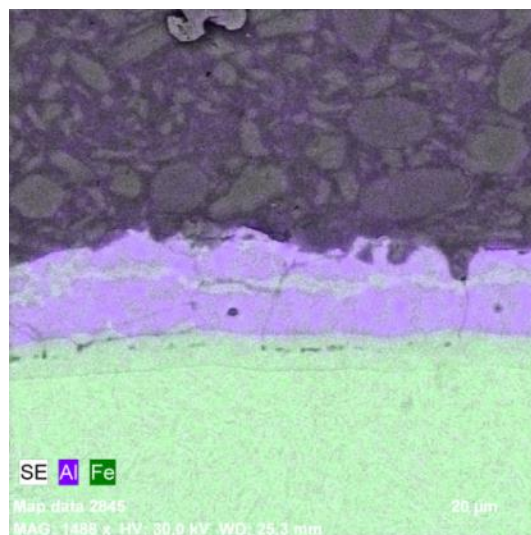
Obr. 3.15: Chemické složení AlSi povlaku



Obr. 3.16: Barevní odstín vzorku po TZ



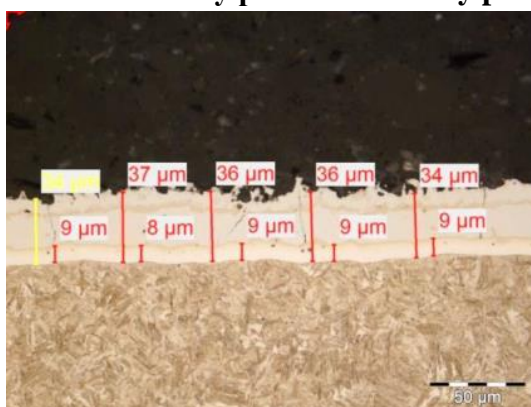
Obr. 3.17: Příčný řez materiálem – viditelné mikrotrhliny, REM, zv. 1500x



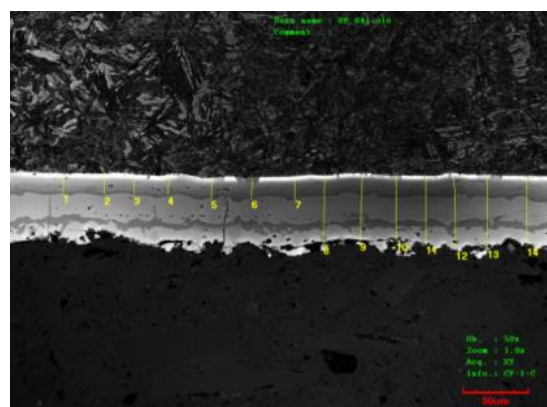
Obr. 3.18: Příčný řez - chemické složení

Na obrázcích 3.11 a 3.13 z elektronového mikroskopu je viditelná struktura povrchu AlSi vrstvy. Jsou zde i viditelné mikrotrhliny (Obr. 3.12 a 3.17), ke kterým dochází při chladnutí vzorku. Je velmi zajímavé, že tyto mikrotrhliny nejsou viditelné na obrázcích 3.13 a 3.14 pořízených optickým konfokálním mikroskopem. Analýzou EDX (Obr. 3.18) bylo zjištěno, že difuzní vrstva se skládá především ze železa. Oxidační vrstva je složena ze slitiny hliníku a železa. Barevné zabarvení vrstvy je do tmavě modré, viz obrázek 3.16. Z obrázku 3.15 je viditelné jaké prvky se nachází na povrchu AlSi povlaku po TZ.

Měření tloušťky povrchové vrstvy po TZ



Obr. 3.19: Měření tloušťky povrchové a difuzní vrstvy, zv. 500x



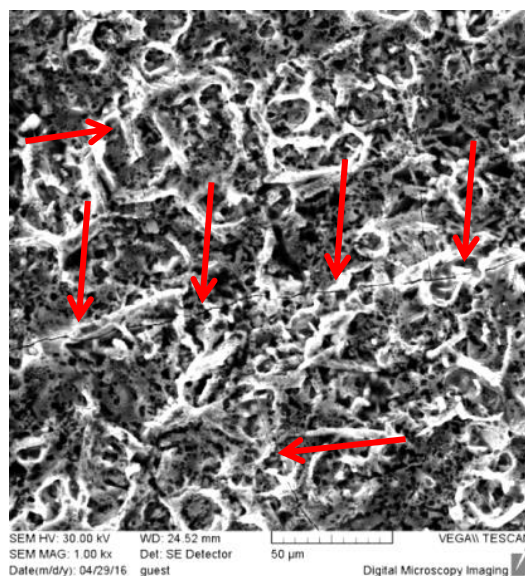
Obr. 3.20: Měření tloušťky povrchové a difuzní vrstvy, zv. 500x

Tloušťka povrchové vrstvy se pohybuje od 34 μm do 37 μm . Tloušťka difuzní vrstvy od 8 μm do 11 μm . Ukázky měření tloušťky vrstev, viz obr. 3.19 a 3.20.

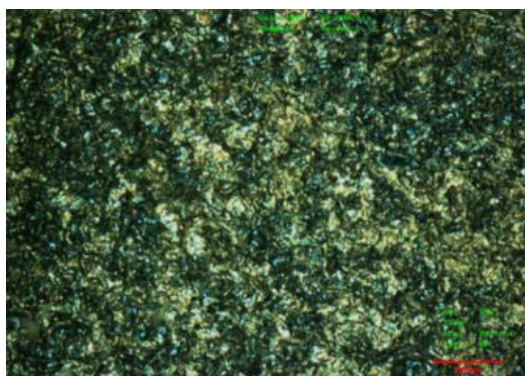
b) Doba tepelného zpracování 12 min



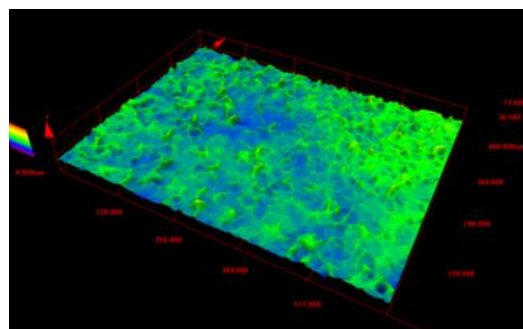
Obr. 3.21: Povrch AlSi povlaku, REM, zv. 500x



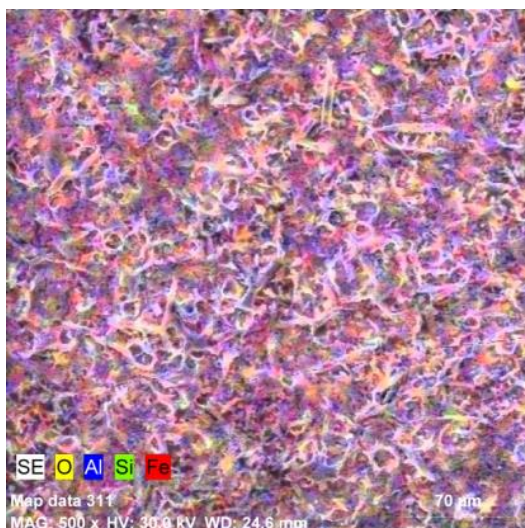
Obr. 3.22: Mikrotrhliny na povrchu Al-Si povlaku., REM, zv. 1000x



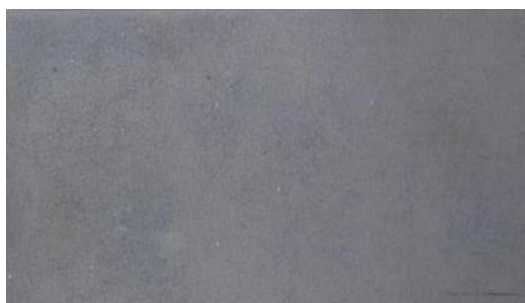
Obr. 3.23: Povrch AlSi povlaku



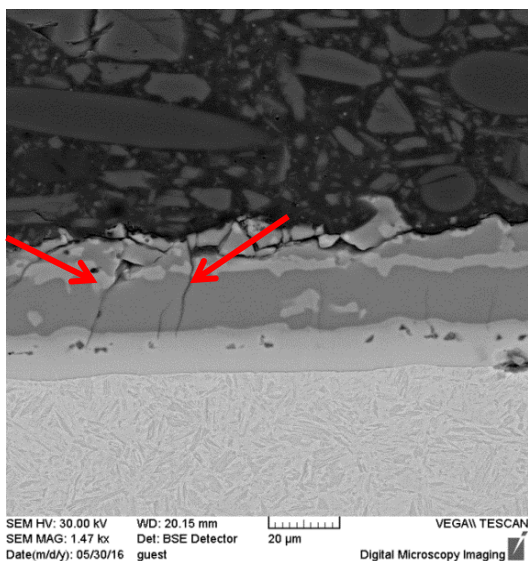
Obr. 3.24: Morfologie povrchu AlSi povlaku



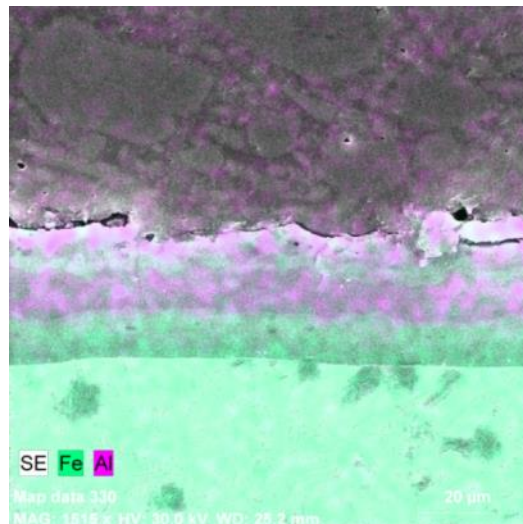
Obr. 3.25: Chemické složení AlSi povlaku



Obr. 3.26: Barevní odstín vzorku po TZ



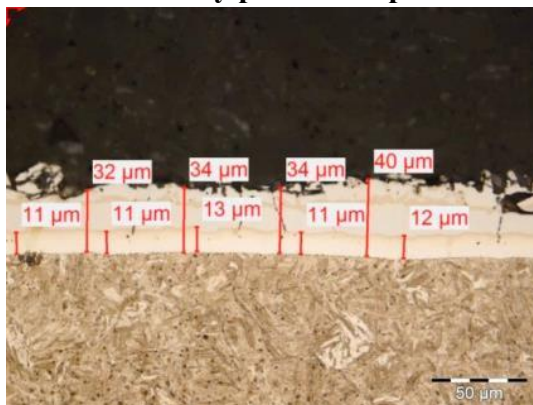
Obr. 3.27: Příčný řez materiálem – viditelné mikrotrhliny, REM, zv. 1500x



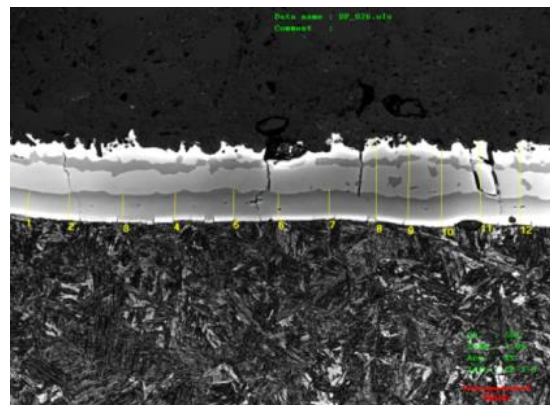
Obr. 3.28: Chemické složení - příčný řez

Povrchová vrstva u vzorků, které byly v peci 12 minut je homogenní (Obr. 3.28). Opět jsou REM analýzou viditelné mikrotrhliny na jejím povrchu, viz obr. 3.22 a 3.27. Chemické složení i struktura povrchové vrstvy dle obrázku 3.25, 3.28, 3.23 a 3.24 je totožné jako u předchozích vzorků. Barevné zabarvení povrchové vrstvy je modro-šedé (Obr. 3.26)

Měření tloušťky povrchové po TZ



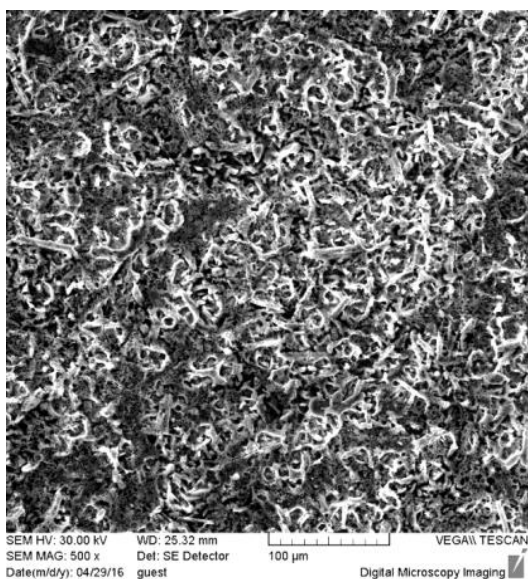
Obr. 3.29: Měření tloušťky povrchové a difuzní vrstvy, zv. 500x



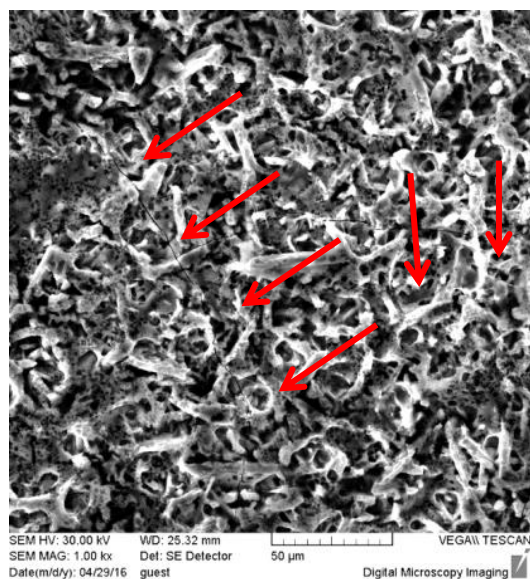
Obr. 3.30: Měření tloušťky povrchové a difuzní vrstvy, zv. 500x

Tloušťka oxidační povrchové vrstvy se pohybuje od 32 µm do 42 µm. Tloušťka difuzní vrstvy od 11 µm do 13 µm (Obr. 3.29 a 3.30).

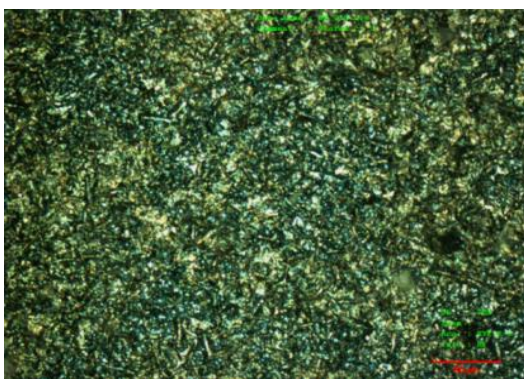
c) Doba tepelného zpracování 16 minut



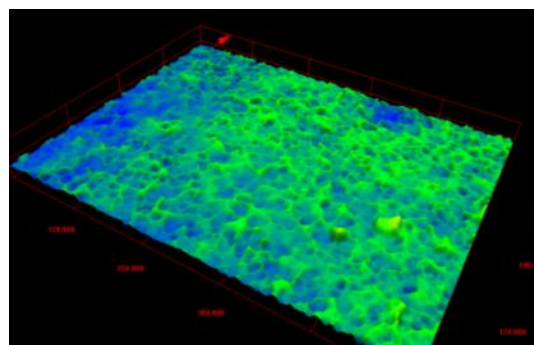
Obr. 3.31: Povrch AlSi povlaku, REM, zv. 500x



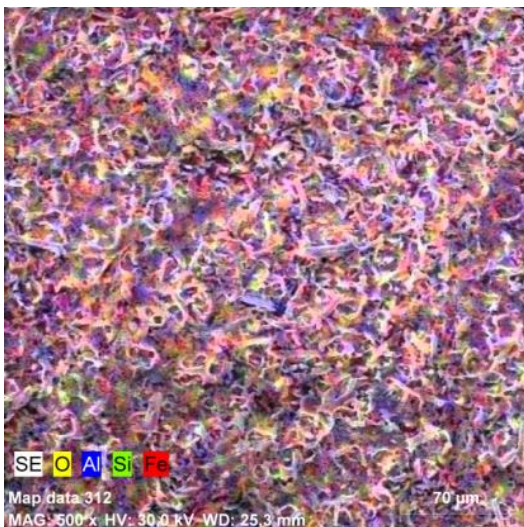
Obr. 3.32: Mikrotrhliny na povrchu AlSi povlaku, REM, zv. 1000x



Obr. 3.33: Povrch AlSi povlaku



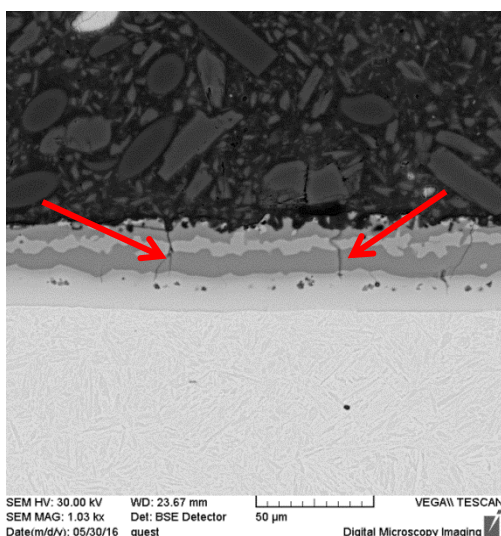
Obr. 3.34: Morfologie povrchu AlSi povlaku



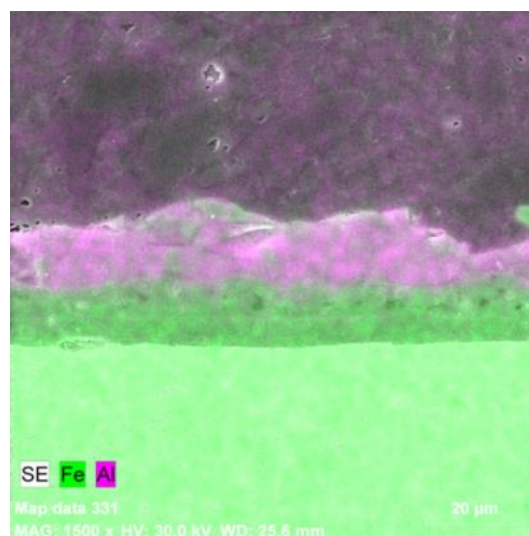
Obr. 3.35: Chemické složení AlSi povlaku



Obr. 3.36: Barevní odstín vzorku po TZ



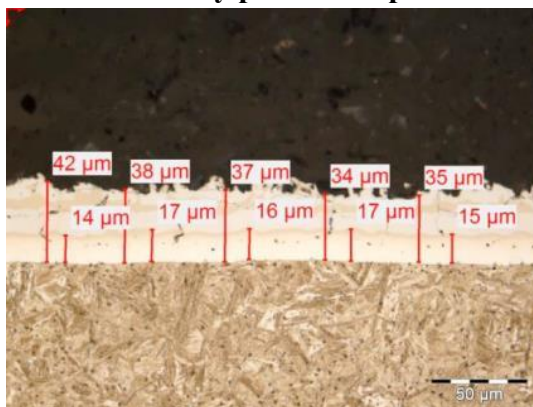
Obr. 3.37: Příčný řez materiálem – viditelné mikrotrhliny, REM, zv. 1500x



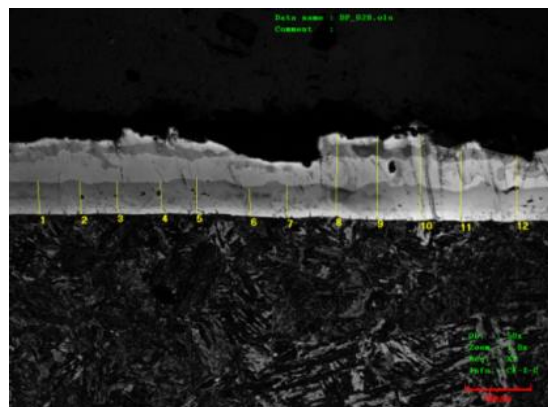
Obr. 3.38: Chemické složení - příčný řez

Povrch povrchové vrstvy vzorků, které byly v peci 16 minut je homogenní s mikrotrhlínami, viz Obr. 3.32 a 3.37. Chemické složení se během pobytu vzorků v peci nijak nezměnilo (obrázky 3.35 a 3.38). Barevné zabarvení povrchové vrstvy je šedé, viz obrázek 3.36. Morfologie povrchu vrstvy se je dle obrázků 3.31 a 3.33 tožná jako v předchozích případech.

Měření tloušťky povrchové po TZ



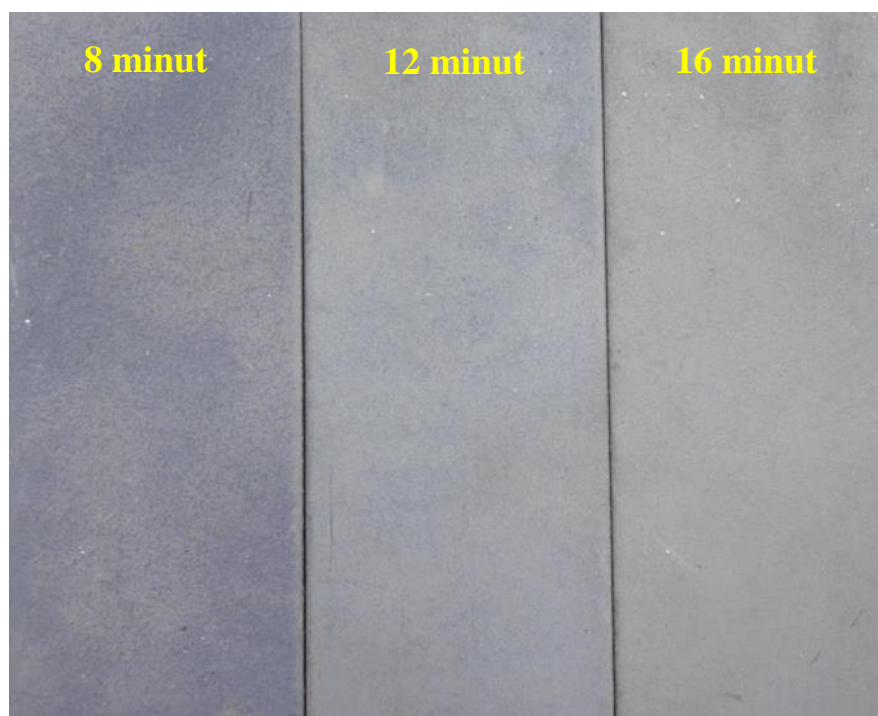
Obr. 3.39: Měření tloušťky povrchové a difuzní vrstvy, zv. 500x



Obr. 3.40: Měření tloušťky povrchové a difuzní vrstvy, zv. 500x

Tloušťka oxidační povrchové vrstvy se pohybuje od 34 μm do 43 μm . Tloušťka difuzní vrstvy od 14 μm do 17 μm . Ukázky měření tloušťky vrstev, viz obr. 3.39 a 3.40.

Porovnání povrchové vrstvy po tepelném zpracování



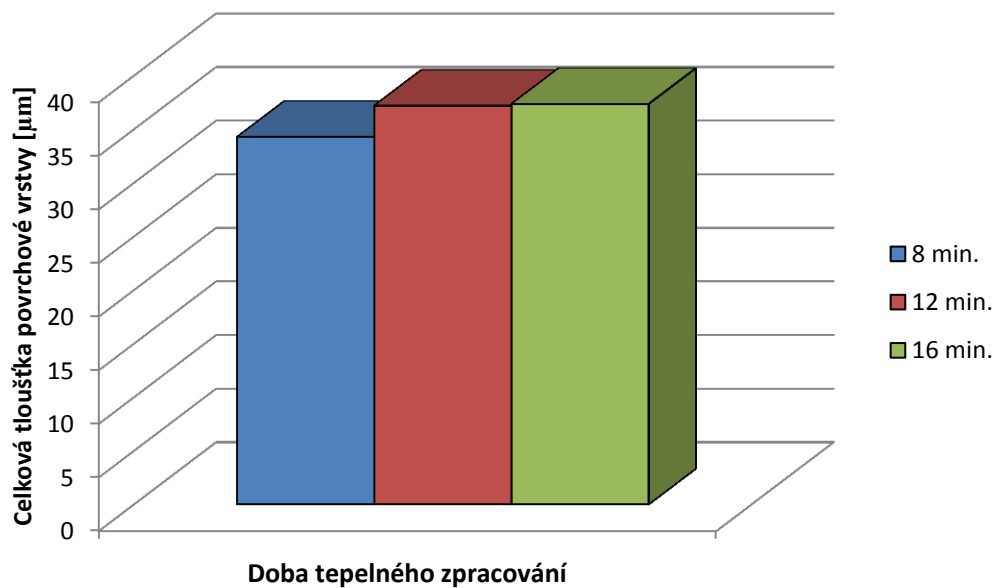
Obr. 3.41: Rozdíl barevných odstínů v závislosti na době tepelného zpracování

Tab. 9: Naměřené tloušťky povrchové vrstvy

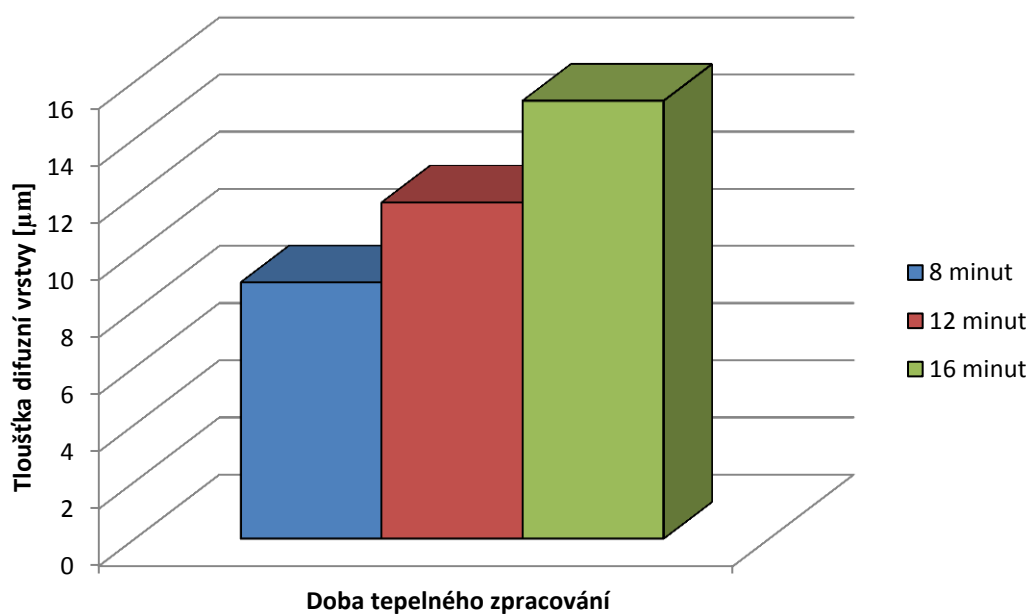
Doba v peci	8 minut	12 minut	16 minut
Zbarvení vrstvy	Tmavě modrá	modro-šedá	šedá
Celková tloušťka povrchové vrstvy [μm]	34 – 37	32 – 42	34 – 43
Tloušťka difuzní vrstvy [μm]	8 – 11	11 – 13	14 – 17

Z výsledků uvedených v tabulce 9 je patrné, že doba pobytu materiálu v peci ovlivňuje vzhled i vlastnosti povrchové vrstvy. Čím déle je materiál v peci tím tlustší je difuzní vrstva a barva povrchové vrstvy se zbarvuje do šeda, viz obrázek 3.41. Celková tloušťka povlaku se mění jen nepatrně. K největší změně došlo mezi 8 a 12 minutami. Graf 2 ukazuje, jak mění celková tloušťka povlaku s dobou TZ. V grafu 3 je zobrazena změna tloušťky difuzní vrstvy v závislosti na době tepelného zpracování.

Barevné zbarvení plechů je důležité pro základní analýzu tepelného zpracování. Díky barvě povrchové vrstvy lze přibližně určit, jakou dobu byl materiál v peci při TZ. Tato skutečnost je důležitá hlavně pro proces svařování vysokopevnostních plechů. Plechy, které zůstávají, při TZ v peci delší dobu jsou obtížněji svařitelné.



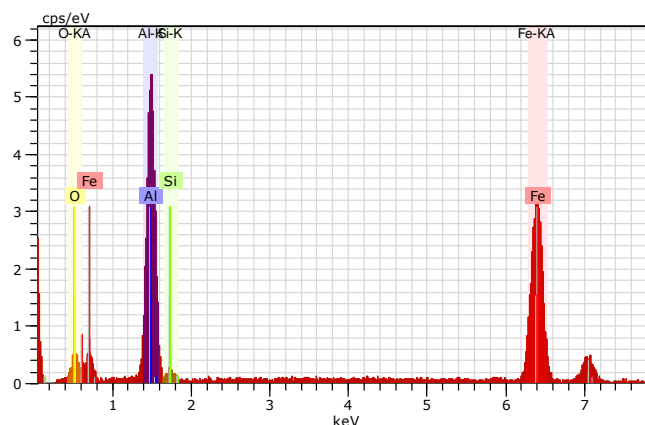
Graf 2: Závislost tloušťky povrchové vrstvy na době tepelného zpracování



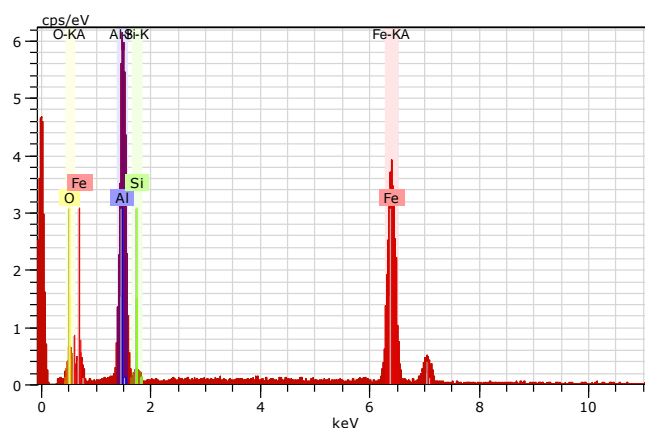
Graf 3: Závislost tloušťky difuzní vrstvy na době tepelného zpracování

Na obrázcích 3.42, 3.43 a 3.45 je znázorněno porovnání chemického složení povrchové vrstvy v závislosti na tepelném zpracování.

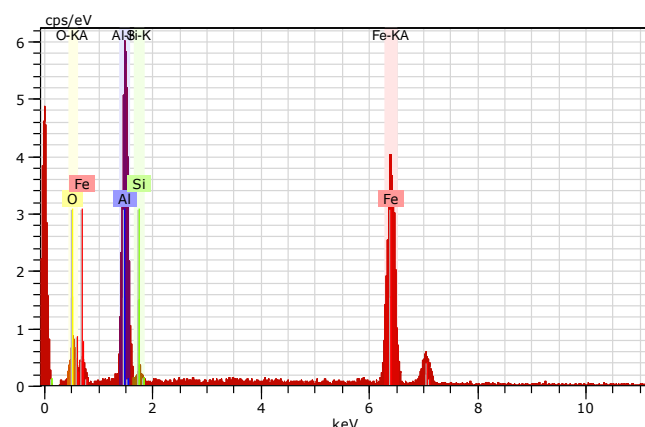
Z chemického spektra je patrné, že chemické složení povrchové vrstvy se s délkou tepelného zpracování příliš nemění. Jediný rozdíl je viditelný mezi časem 8 a 12 minut, kdy je na povrchu AlSi vrstvy vyloučeno více hliníku.



Obr. 3.42: Chemické složení povrchové vrstvy po tepelném zpracování – 8 minut



Obr. 3.43: Chemické složení povrchové vrstvy po tepelném zpracování – 12 minut



Obr. 3.45: Chemické složení povrchové vrstvy po tepelném zpracování – 16 minut

To jaký bude mít povrchová vrstva vliv na pevnost lepeného spoje, bude zjištěno v další části experimentu.

3.4. Analýza lepených spojů testovaných staticky

Vzorky pro analýzu lepených spojů testovaných staticky byly připraveny stejně jako pro analýzu povrchové vrstvy. Kdy po tepelném zpracování plechů následovalo slepení vzorků. Velikost lepené plochy byla 10x25mm dle předpisu normy PV 12.35. Lepidla byla přehřátá na teplotu cca. 50°C pro jednodušší aplikaci. Lepidlo bylo nanášeno na jednu část zkušební vzorku, pro zajištění správné tloušťky lepidla ve spoji, byly použity distanční měděné drátky o průměru 0,2mm, poté byly obě části vzorků k sobě přiloženy a stlačeny tak aby došlo ke kontaktu s distančními drátky. Díky tomu došlo k vytlačení přebytečného množství lepidla ze spoje. Takto připravený slep byl zajištěn svorkami, které zajišťovaly správnou pozici obou částí vzorků vůči sobě. Vzorky byly slepovány bez použití přídavného maziva.

Připravené vzorky byly posléze umístěny na rošt a vloženy do sušárny. Sušárna byla přehřátá na cca. 180°C. Zde vzorky setrvaly po dobu cca. 20 minut, během kterých došlo k jejich vytvrzení (stejně podmínky, které panují při vytvrzování karoserie v KTL ŠKODA AUTO).

Tímto způsobem bylo připraveno celkem 90 vzorků pro různé tepelné zpracování (8, 12 a 16 minut) pro statickou smykovou zkoušku Na obrázku 3.46 je ukázán připravený slepený vzorek pro statickou smykovou zkoušku.



Obr. 3.46: Vzorek pro statickou zkoušku

Vzorky byly testovány na Technické univerzitě v Liberci na katedře Strojírenské technologie oddělení Tváření kovů a plastů. Dle normy PV 12.35 byla pevnost lepených spojů zkoušena za zvýšené teploty +80 °C, za pokojové teploty RT (+23 °C) a za snížené teploty -35 °C. Pro každý interval tepelného zpracování 8, 12 a 16 minut bylo připraveno 5 zkušebních vzorků. Pro vytvoření lepeného spoje použity dvě zkušební lepidla (Sikapower 492G a Betamate 1440G). Celkem bylo pro statickou smykovou zkoušku dle normy PV 12.35 připraveno 90 zkušebních vzorků.

Zkoušky pevnosti byly prováděny na trhacím stroji TiraTest 2300 s průtahoměrem KAF 10kN, rychlost zatěžování byla dle normy PV 12.35 10 mm/min.

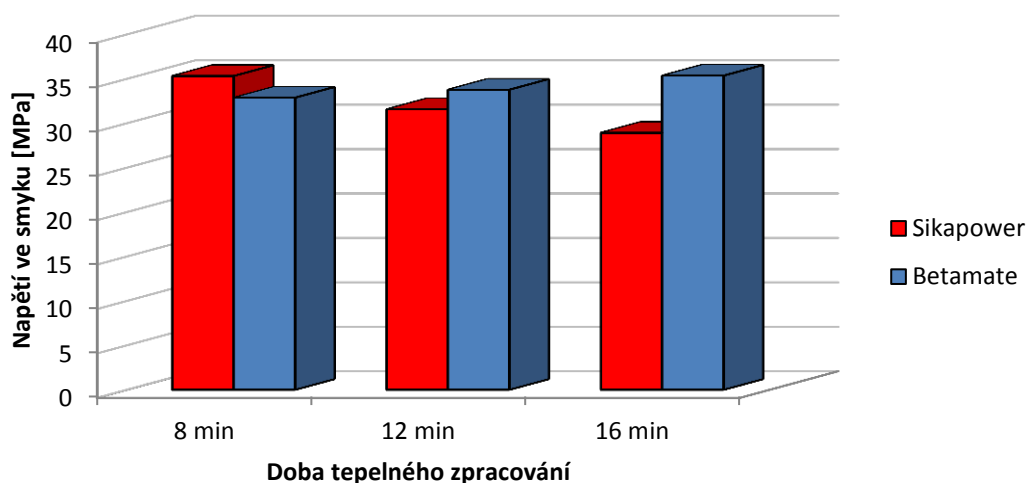
Zkušební tělesa byla před vlastní zkouškou vytemperována na potřebnou teplotu. V případě snížení teploty $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ byla temperována dusíkem, u zvýšené teploty $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve zkušební peci. Následně byla zatížena rychlostí 10 mm/min . Typ porušení byl vyhodnocen dle normy ISO 10365. Určování procentuálního rozložení typů lomu na lomové ploše je subjektivní, proto se výsledky vyhodnocení mohou lišit podle různých vyhodnocovatelů.

V tabulkách 10, 13 a 16 jsou uvedeny průměrné hodnoty výsledků statické smykové zkoušky získaných z 5 zkušebních vzorků pro každý teplotní interval a pro obě použítá lepidla.

3.4.1. Vzorky testované za pokojové teploty ($+23\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Tab. 10: Naměřené mechanické hodnoty použitého lepidla při smykové zkoušce PV 12.35 za pokojové teploty

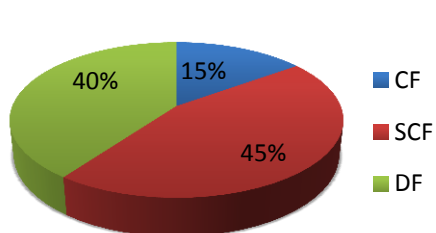
Zkouška ve smyku dle normy PV 12.35			
Mazivo: bez maziva			
Vytvrzeno: $180\text{ }^{\circ}\text{C}/20\text{ min}$		Tloušťka lepidla: $0,2\text{ mm}$	
Lepidlo / Doba substrátu v peci		Sikapower 492G	Betamate 1440G
Pevnost ve smyku [MPa]	8 min	$35,3 \pm 1,8$	$32,9 \pm 4,4$
	12 min	$31,6 \pm 0,7$	$33,8 \pm 2,8$
	16 min	$28,9 \pm 3,0$	$35,4 \pm 2,1$



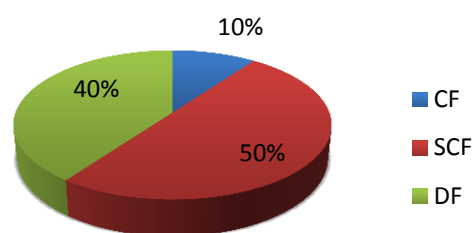
Graf 4: Výsledky smykové zkoušky dle normy PV 12.35 za pokojové teploty ($+23\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Tab. 11: Typ porušení lepených spojů testovaných za pokojové teploty
 Sikapower 492G

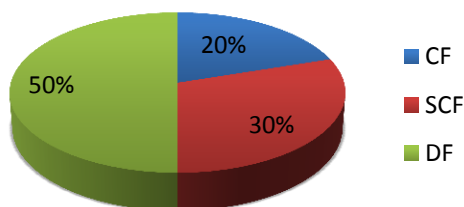
Lepidlo		Sikapower 492G		
Doba substrátu v peci		8 min	12 min	16 min
Typ porušení [%]	CF	15	10	20
	SCF	45	50	30
	DF	40	40	50



Graf 5: Typ porušení lepidla Sikapower 492G, doba TZ - 8 minut



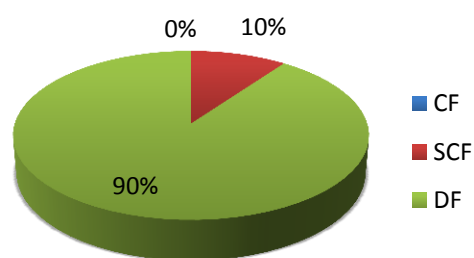
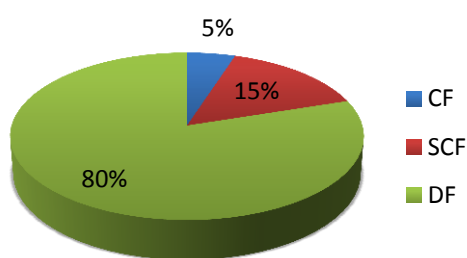
Graf 6: Typ porušení lepidla Sikapower 492G, doba TZ - 12 minut



Graf 7: Typ porušení lepidla Sikapower 492G, doba TZ - 16 minut

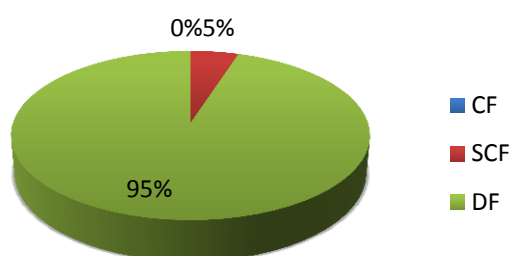
Tab. 12: Typ porušení lepených spojů testovaných za pokojové teploty
 Betamate 1440G

Lepidlo		Betamate 1440G		
Doba substrátu v peci		8 min	12 min	16 min
Typ porušení [%]	CF	5	0	0
	SCF	15	10	5
	DF	80	90	95



Graf 8: Typ porušení lepidla Betamate 1440G, doba TZ - 8 minut

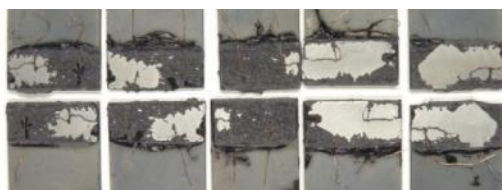
Graf 8: Typ porušení lepidla Betamate 1440G, doba TZ - 12 minut



Graf 9: Typ porušení lepidla Betamate 1440G, doba TZ - 16 minut

Ukázka lomových ploch zkušebních vzorků

Sikapower 492G

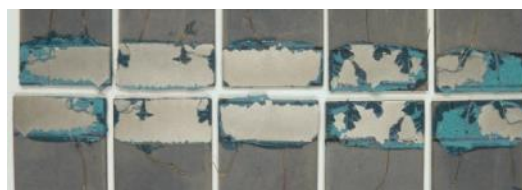


Obr. 3.47: Lomové plochy vzorků testovaných za pokojové teploty, doba tepelného zpracování 8 minut

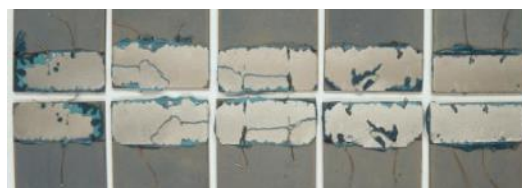


Obr. 3.49: Lomové plochy vzorků testovaných za pokojové teploty, doba tepelného zpracování 12 minut

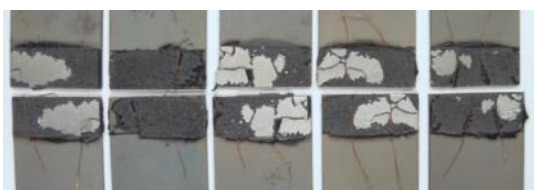
Betamate 1440G



Obr. 3.48: Lomové plochy vzorků testovaných za pokojové teploty, doba tepelného zpracování 8 minut



Obr. 3.50: Lomové plochy vzorků testovaných za pokojové teploty, doba tepelného zpracování 12 minut



Obr. 3.51: Lomové plochy vzorků testovaných za pokojové teploty, doba tepelného zpracování 16 minut



Obr. 3.52: Lomové plochy vzorků testovaných za pokojové teploty, doba tepelného zpracování 16 minut

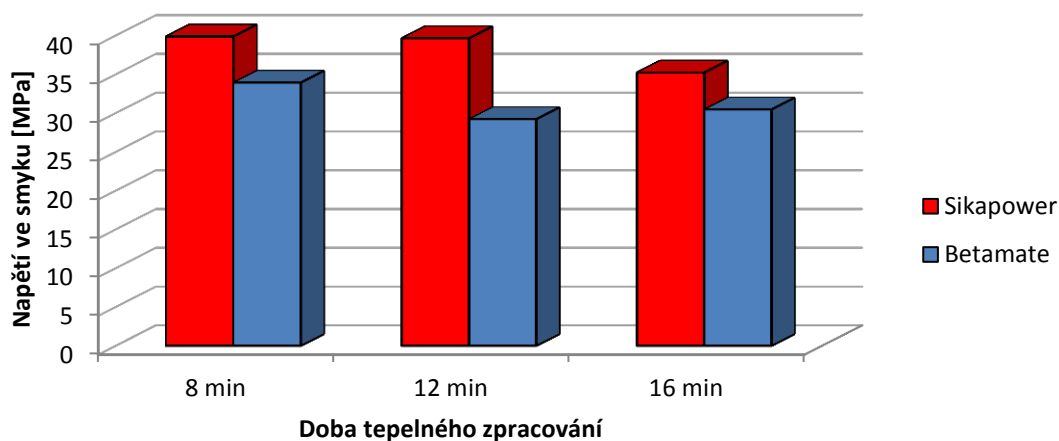
Při zkoušce za pokojové teploty byl viditelný minimální rozdíl v pevnosti lepidla Betamate 1440G v závislosti na době, kterou substrát strávil v peci při tepelném zpracování, viz tabulka 10. Pevnosti ve smyku se u lepidla Sikapower 492G se s dobou substrátu v peci snižuje. Tuto okolnost ukazuje i graf 4. Z něho je jasně zřejmé, jaký je rozdíl v mezi pevnosti mezi oběma lepidly.

Typ porušení u obou použitých lepidel je velmi podobný, viz obrázky 3.47 až 3.52. U lepidla Sikapower 492G převládá bez rozdílu na době zpracování substrátu delaminační porušení (DF) se speciálně kohezní porušení (SCF), viz grafy 5 až 9 a tabulky 11 a 12. Zatím co u lepidla Betamate 1440G je viditelná určitá souvislost mezi druhem porušení a dobou substrátu v peci. Kdy u substrátu s dobou TZ 8 minut došlo k delaminačnímu porušení spolu se speciálním kohezním porušením. U substrátů, které byly v peci 12 a 16 minut převládá hlavně delaminační porušení spoje.

3.4.2. Vzorky testované za snížené teploty (-35 °C)

Tab. 13: Naměřené mechanické hodnoty použitého lepidla při smykové zkoušce PV 12.35 za snížené teploty

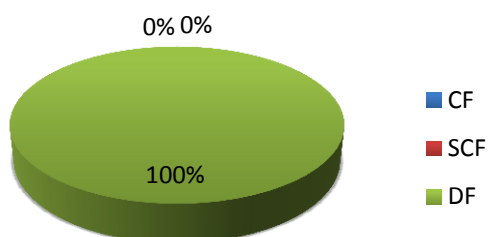
Zkouška ve smyku dle normy PV 12.35			
Mazivo: bez maziva			
Vytvrzeno: 180 °C/20 min		Tloušťka lepidla: 0,2 mm	
Lepidlo / Doba substrátu v peci		Sikapower 492G	Betamate 1440G
Pevnost ve smyku [MPa]	8 min	39,9 ± 2,7	34,0 ± 2,5
	12 min	39,7 ± 3,4	29,2 ± 2,6
	16 min	35,3 ± 4,7	30,5 ± 1,8



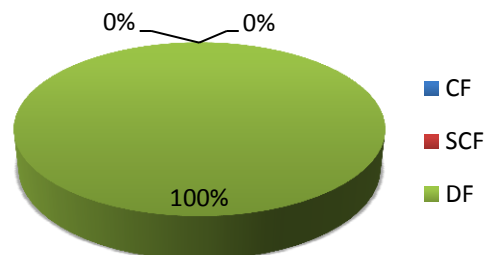
Graf 10: Výsledky smykové zkoušky dle normy PV 12.35 za snížené teploty (-35°C)

Tab. 14: Typ porušení lepených spojů testovaných za snížené teploty
Sikapower 492G

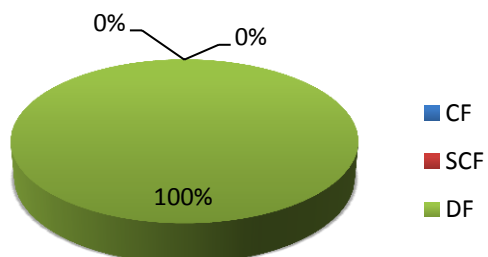
Lepidlo		Sikapower 492G		
Doba substrátu v peci		8 min	12 min	16 min
Typ porušení [%]	SF	0	0	0
	CSF	0	0	0
	DF	100	100	100



Graf 11: Typ porušení lepidla Sikapower 492G, doba TZ - 8 minut



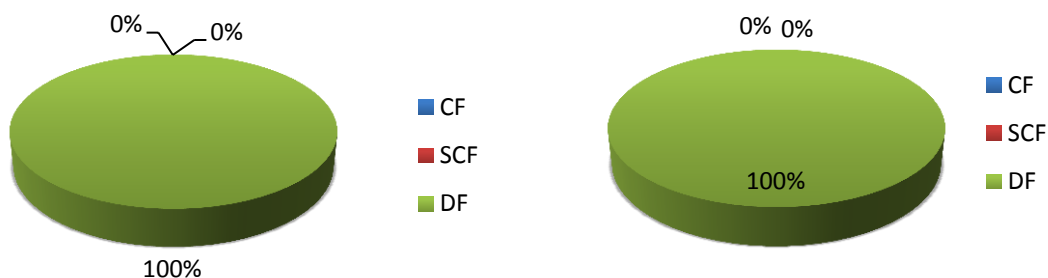
Graf 12: Typ porušení lepidla Sikapower 492G, doba TZ - 12 minut



Graf 13: Typ porušení lepidla Sikapower 492G, doba TZ - 16 minut

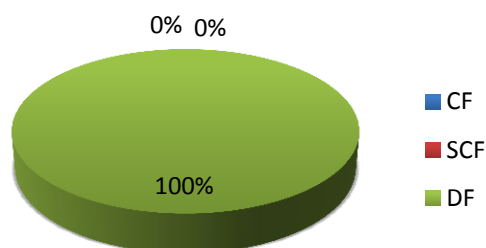
Tab. 15: Typ porušení lepených spojů testovaných za snížené teploty
 Betamate 1440G

Lepidlo		Betamate 1440G		
Doba substrátu v peci		8 min	12 min	16 min
Typ porušení [%]	SF	0	0	0
	CSF	0	0	0
	DF	100	100	100



Graf 14: Typ porušení lepidla Betamate 1440G, doba TZ - 8 minut

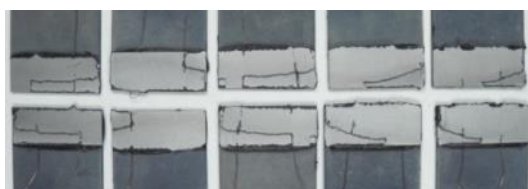
Graf 15: Typ porušení lepidla Betamate 1440G, doba TZ - 12 minut



Graf 16: Typ porušení lepidla Betamate 1440G, TZ - 16 minut

Ukázka lomových ploch zkušebních vzorků

Sikapower 492G

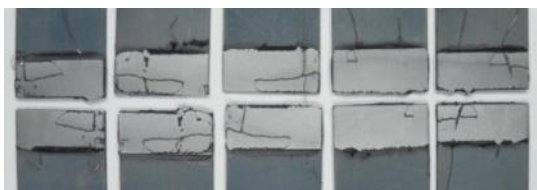


Obr. 3.53: Lomové plochy vzorků testovaných za snížené teploty, doba tepelného zpracování 8 minut

Betamate 1440G



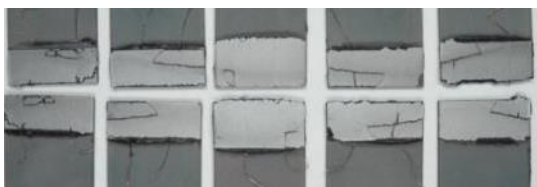
Obr. 3.54: Lomové plochy vzorků testovaných za snížené teploty, doba tepelného zpracování 8 minut



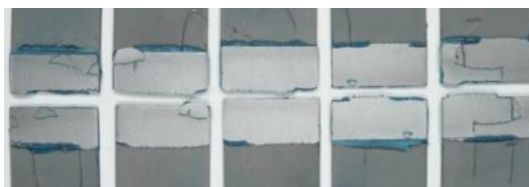
- Obr. 3.55: Lomové plochy vzorků testovaných za snížené teploty, doba tepelného zpracování 12 minut



Obr. 3.56: Lomové plochy vzorků testovaných za snížené teploty, doba tepelného zpracování 12 minut



Obr. 3.57: Lomové plochy vzorků testovaných za snížené teploty, doba tepelného zpracování 16 minut



Obr. 3.58: Lomové plochy vzorků testovaných za snížené teploty, doba tepelného zpracování 16 minut

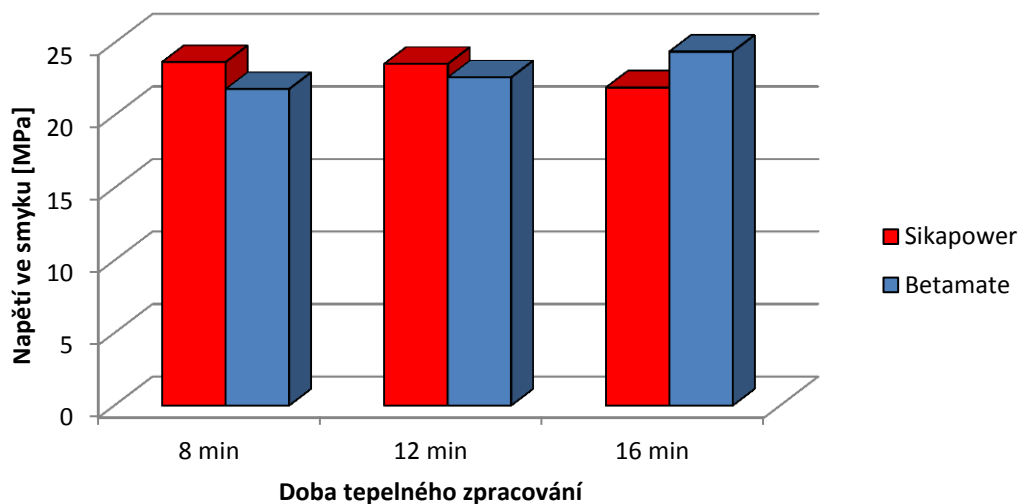
Obecně při nízkých teplotách dochází ke křehnutí materiálů, s tím i ke snížení jejich pevnosti. Strukturní lepidla pro lepení karoserií automobilů jsou cíleně upravována pro vysokou pevnost a zároveň dostatečnou flexibilitu. V tab. 13 jsou zaznamenány hodnoty meze pevnosti ve smyku pro všechny teploty přípravy vzorků (8, 12, a 16 minut). Tato tabulka 13 ukazuje, že je rozdíl v pevnosti mezi použitými lepidly. Rozdíl mezi poklesem pevnosti jednotlivých lepidel u různého tepelného zpracování substrátů je znatelný. Z grafu č. 17 je viditelné, že dochází ke snížení pevnosti spoje, pokud stráví materiál delší dobu v peci při tepelném zpracování.

Z obrázku (Obr. 3.53 až 3.58), grafů (11 až 16) a tabulek 14 a 15 je patrné že hlavním typem porušení vzorků, které byly zkoušeny za snížení teploty, je výhradně delaminační. Tedy, že došlo k porušení povrchové vrstvy substrátu, nikoliv lepidla.

3.4.3. Vzorky testované za zvýšené teploty (+80 °C)

Tab. 16: Naměřené mechanické hodnoty použitého lepidla při smykové zkoušce PV 12.35 za zvýšené teploty

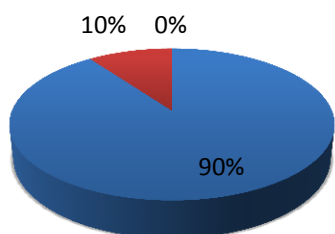
Zkouška ve smyku dle normy PV 12.35			
Mazivo: bez maziva			
Vytvrzeno: 180 °C/20 min		Tloušťka lepidla: 0,2mm	
Lepidlo / Doba substrátu v peci		Sikapower 492G	Betamate 1440G
Pevnost ve smyku [MPa]	8 min	23,7 ± 1,9	21,8 ± 0,7
	12 min	23,5 ± 1,4	22,6 ± 1,1
	16 min	21,9 ± 2,2	24,4 ± 1,8



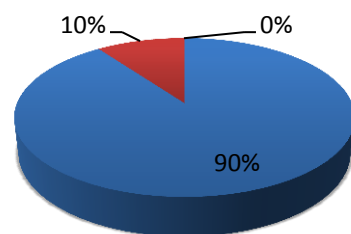
Graf 17: Výsledky smykové zkoušky dle normy PV 12.35 za zvýšené teploty (+ 80°C)

Tab. 17: Typ porušení lepených spojů testovaných za zvýšené teploty
Sikapower 492G

Lepidlo		Sikapower 492G		
Doba substrátu v peci		8 min	12 min	16 min
Typ porušení [%]	CF	90	90	90
	SCF	10	10	10
	AF	0	0	0



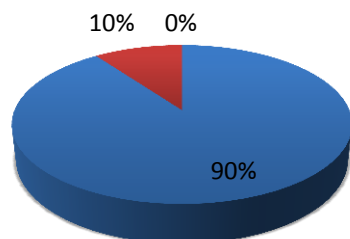
■ CF
■ SCF
■ AF



■ CF
■ SCF
■ AF

Graf 18: Typ porušení lepidla Sikapower 492G, doba TZ - 8 minut

Graf 19: Typ porušení lepidla Sikapower 492G, doba TZ - 12 minut

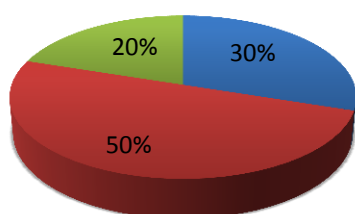


■ CF
■ SCF
■ AF

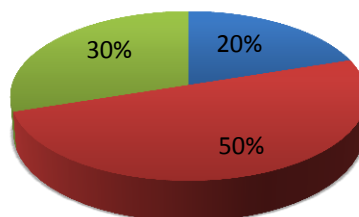
Graf 20: Typ porušení lepidla Sikapower 492G, doba TZ - 16 minut

Tab. 18: Typ porušení lepených spojů testovaných za zvýšené teploty
 Betamate 1440G

Lepidlo		Betamate 1440G		
Doba substrátu v peci		8 min	12 min	16 min
Typ porušení [%]	CF	30	20	10
	SCF	50	50	60
	AF	20	30	30

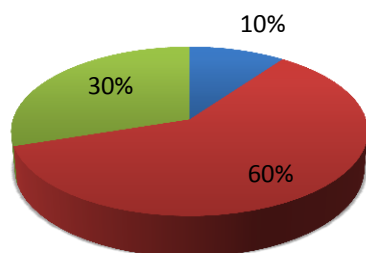


■ CF
 ■ SCF
 ■ AF



■ CF
 ■ SCF
 ■ AF

Graf 21: Typ porušení lepidla Betamate 1440, doba TZ - 8 minut
 Graf 22: Typ porušení lepidla Betamate 1440, doba TZ - 12 minut

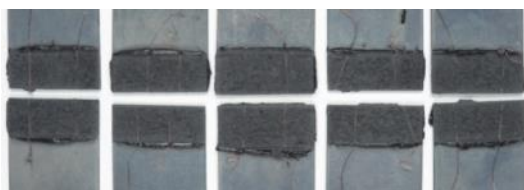


■ CF
 ■ SCF
 ■ AF

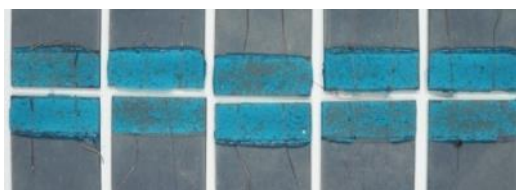
Graf 23: Typ porušení lepidla Betamate 1440, doba TZ - 16 minut

Ukázka lomových ploch zkušebních vzorků

Sikapower 492G

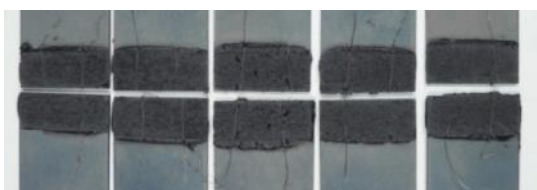


Betamate 1440G



Obr. 3.59: Lomové plochy vzorků testovaných za zvýšené teploty, doba tepelného zpracování 8 minut

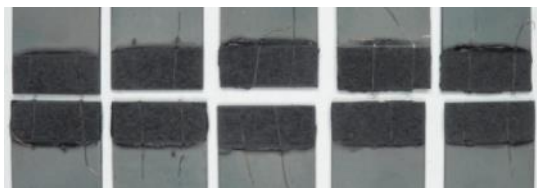
Obr. 3.60: Lomové plochy vzorků testovaných za zvýšené teploty, doba tepelného zpracování 8 minut



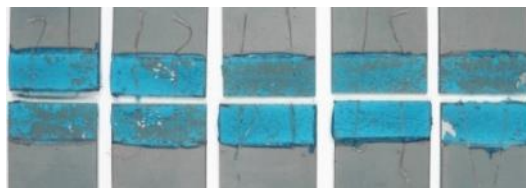
Obr. 3.61: Lomové plochy vzorků testovaných za zvýšené teploty, doba tepelného zpracování 12 minut



Obr. 3.62: Lomové plochy vzorků testovaných za zvýšené teploty, doba tepelného zpracování 12 minut



Obr. 3.63: Lomové plochy vzorků testovaných za zvýšené teploty, doba tepelného zpracování 16 minut

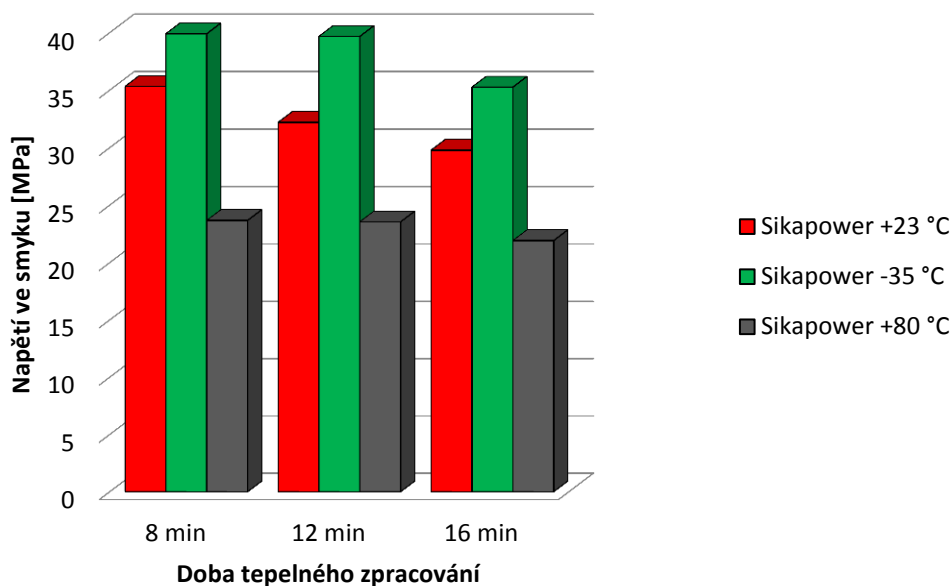


Obr. 3.64: Lomové plochy vzorků testovaných za zvýšené teploty, doba tepelného zpracování 16 minut

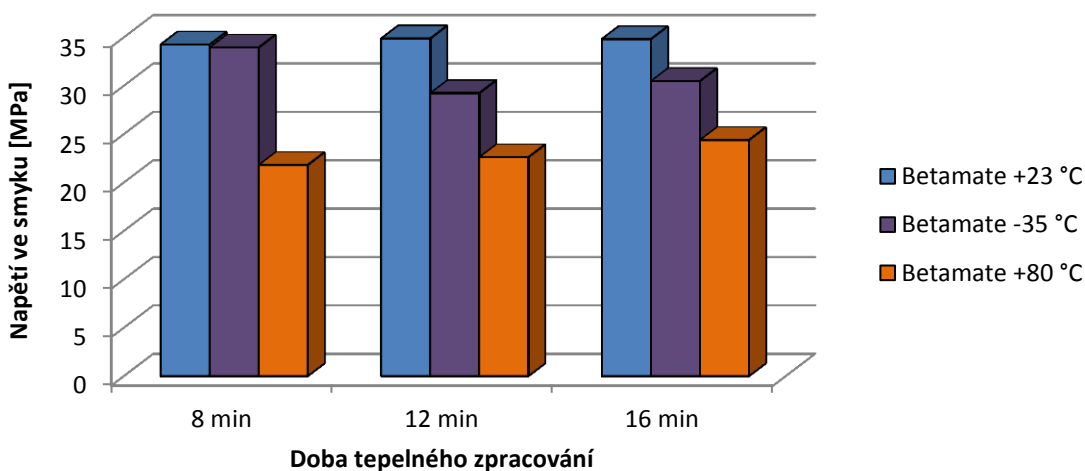
Připravené vzorky byly pro zkoušku za zvýšené teploty $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ vytemperovány na potřebnou teplotu a následně byla provedena smyková zkouška. Vyšší teplota má negativní vliv na mechanické vlastnosti lepidel, ale zároveň není natolik vysoká, aby došlo k tepelnému ovlivnění substrátu.

U lepidla Sikapower 492G došlo ve všech případech výhradně ke koheznímu typu lomu (CF nebo SCF), viz tabulka 17 a grafy 18 až 20. U lepidla Betamate 1440G nebylo možné jasně určit o jaký typ lomu se jedná. Převažuje především speciálně kohezní lom (SCF), dále se objevuje i kohezní a adhezivní typ lomu (tabulka 18 a grafy 21 až 23). Na obrázcích 3.59 až 3.64 jsou viditelné lomové plochy vzorků testovaných za zvýšené teploty. Graf 17 s tabulkou 16 ukazují hodnoty smykového napětí v závislosti na době tepelného zpracování. Kdy u lepidla Sikapower 492 G došlo k postupnému snížení smykové pevnosti spoje s dobou substrátu v peci a u lepidla Betamate 1440 G naopak ke zvýšení pevnosti spoje s dobou substrátu v peci.

3.4.4. Shrnutí výsledků smykové zkoušky



Graf 24: Souhrnné výsledky zkoušky dle PV 12.35 pro lepidlo Sikapower 492G



Graf 25: Souhrnné výsledky zkoušky dle PV 12.35 pro lepidlo Betamate 1440G

V grafech 24 a 25 jsou znázorněny výsledky smykové zkoušky u všech připravených vzorků. Z grafů 24 a 25 je patrné, že největší pevnost ve smyku mělo lepidlo Sikapower 492G za snížené teploty nanesené na substrát, který setrval v peci 8 respektive 12 minut. Naopak nejnižší pevnost ve smyku byla naměřena u lepidla Betamate 1440G na vzorcích testovaných za zvýšené teploty s dobou tepelného zpracování substrátu 8 minut.

Z grafů 24 a 25 je i dobře viditelné, že u lepidla Betamate 1440G, při zkouškách za pokojové teploty, byly naměřeny jen malé odchylky v hodnotách meze pev-

nosti ve smyku bez závislosti na době tepelného zpracování. Zatím co u lepidla Sikapower 492 G docházelo k poklesu meze pevnosti ve smyku lepeného spoje.

Další část experimentu byla zaměřena na analýzu lomových ploch lepených spojů.

3.5. Analýza porušení lepených spojů testovaných staticky

Poté co byly připravené vzorky podrobeny smykové zkoušce, bylo nutné provést analýzu lomových ploch. Analýza lomových ploch byla realizována na stereomikroskopu Olympus SZH 10, konfokálním optickém mikroskopu, dále pak na rastrovacím elektronovém mikroskopu Tescan Vega XMU a metalografickém mikroskopu Olympus GX 71 na kterém byly analyzovány příčné řezy přes lomovou plochu vzorků.

3.5.1. Analýzy lomových ploch

1) Vzorky zkoušené za pokojové teploty (+23 °C)

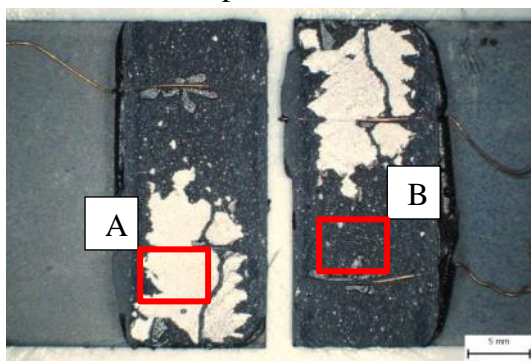
U vzorků testovaných za pokojové teploty (+23°C) jsou lomové plochy členité, s různými typy porušení.

Lomové plochy u lepidla Sikapower 492G jsou tvořeny kohezním a delaminačním typem lomu (obrázky 3.65, 3.67 a 3.69), kdy v kohézní části lomu došlo k překonání soudržnosti lepidla a na obou částech substrátu jsou patrné zbytky lepidla. V delaminační části lomové plochy vznikly stejným způsobem jako u vzorků testovaných za snížené teploty, tedy odtržením železo-hliníko-křemíko (Al-Si-Fe) intermetalické fáze od difuzní vrstvy. Dle normy ISO 10365 došlo k selhání lepeného spoje vinou použitého substrátu. Typ lomu je označován jako delaminační (DF).

Procentuální podíl kohezního a delaminačního typu lomu byl u zkoušených vzorků cca. 50%:50%. Na vzorcích nebyla viditelná závislost mezi časem, který byl materiál ponechán v peci při tepelném zpracování a typem lomu.

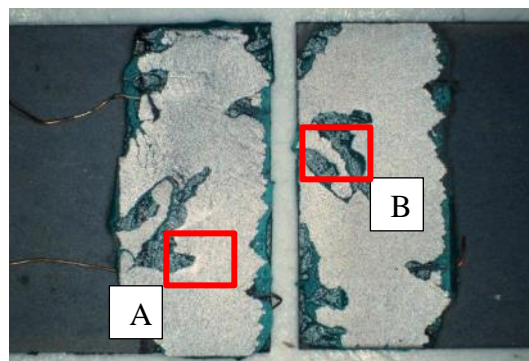
U lepidla Betamate 1440G převažuje delaminační typ lomu (obrázky 3.66, 3.68 a 3.70) jen místně se objevuje kohezní druh porušení. Je zde patrná závislost mezi druhem lomu a dobou, kterou materiál strávil v peci, viz obrázky 3.47 až 3.52. Z obrázků je patrné, že s delší dobou tepelného zpracování dochází ke zvýšení pravděpodobnosti k tvorbě delaminačních lomů.

Sikapower 492G



Obr. 3.65: Tvar lomové plochy za pokojové teploty, doba TZ 8 minut

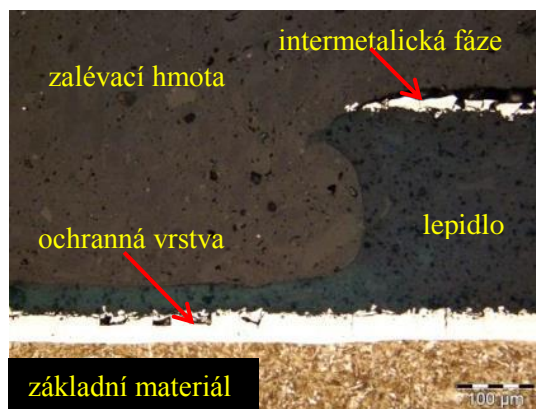
Betamate 1440G



Obr. 3.66: Tvar lomové plochy za pokojové teploty, doba TZ 16 minut



Obr. 3.67: Metalografický řez lomovou plochou vzorku v oblasti A (doba tepelného zpracování 8 minut), zv. 200x



Obr. 3.68: Metalografický řez lomovou plochou vzorku v oblasti A (doba tepelného zpracování 16 minut), zv. 200x

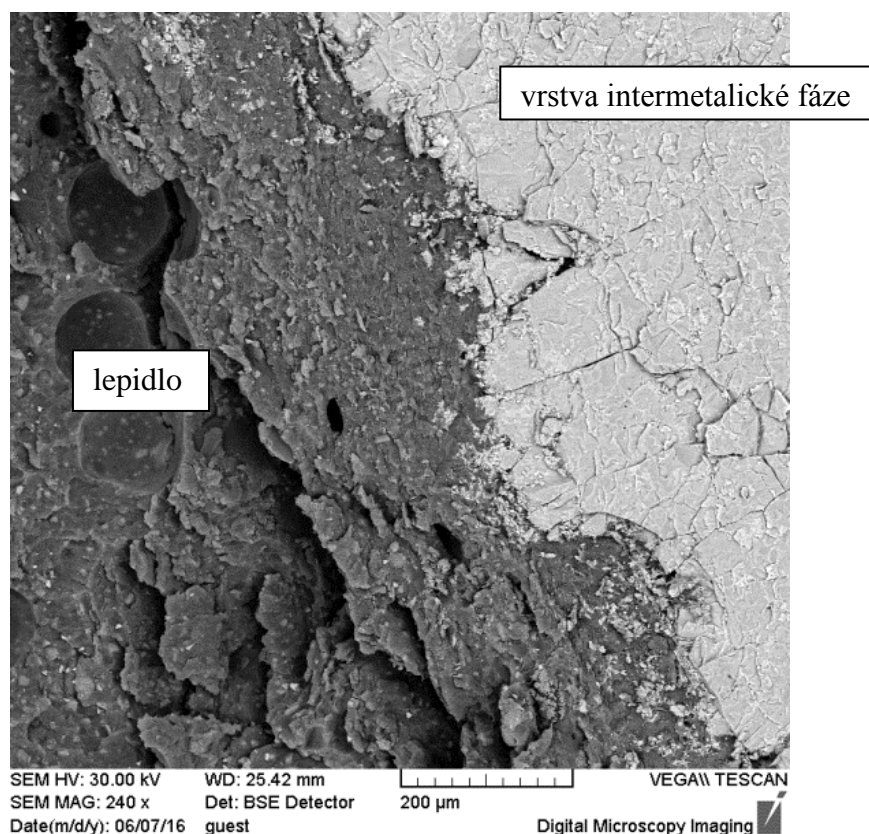


Obr. 3.69: Metalografický řez lomovou plochou vzorku v oblasti B (doba tepelného zpracování 8 minut), zv. 200x

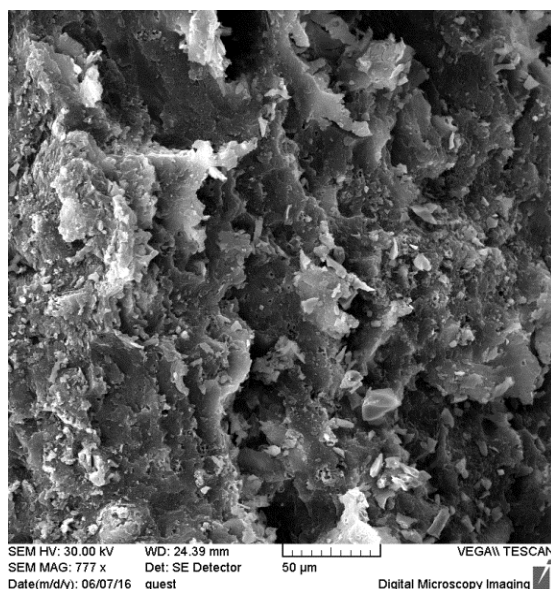


Obr. 3.70: Metalografický řez lomovou plochou vzorku v oblasti B (doba tepelného zpracování 16 minut), zv. 200x

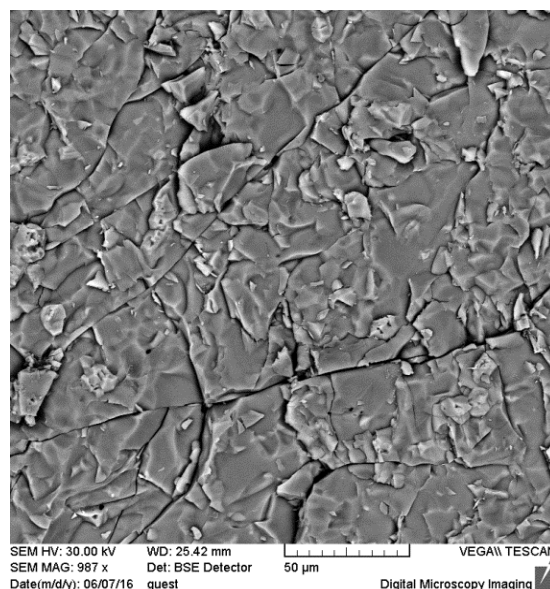
Doplňující obrázky



Obr. 3.71 : Lomová plocha lepidla Sikapower 492G (+23°C, 12 minut)



Obr. 3.72: Detail lomové plochy lepidla (Betamate 1440G, +23°C, 12 minut)



Obr. 3.73: Detail vrstvy intermetalická fáze (Sikapower 492G, +23°C, 12 minut)

Na obrázku 3.71 je lomová plocha lepidla Sikapower 492 G pořízený elektronovým mikroskopem. Obrázky 3.72 a 3.73 ukazují detaily jednotlivých složek lomové plochy.

2) Vzorky zkoušené za snížené teploty (-35°C)

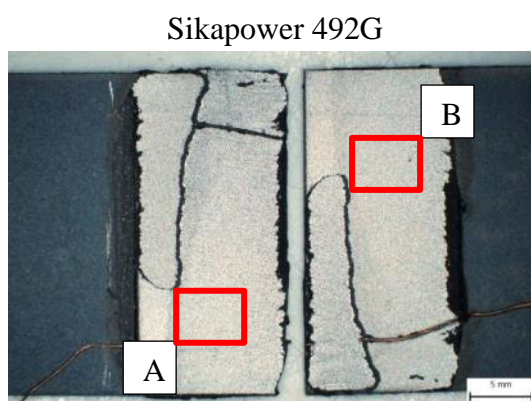
U vzorků testovaných za snížené teploty (-35°C) došlo ke sjednocení tvaru lomových ploch. Lomové plochy neobsahují stopy kohezního či speciálně kohezního typu porušení jako je tomu u vzorků testovaných za pokojové teploty.

Lomové plochy vzorků testovaných za snížené teploty jsou u obou použitých lepidel prakticky shodné. Z obrázků 3.74 až 3.79 je patrné, že k porušení lepeného spoje nedošlo kvůli nízkým kohezním silám lepidel, ale bylo to v důsledku nízkých adhezních sil mezi železo-hliníko-křemíkovou (Fe-Al-Si) intermetalickou fází a difuzní vrstvou. Kdy intermetalická fáze zůstala přilepená k lepidlu. Tato intermetalická fáze má velmi vysokou tvrdost (až 1100 Vickersů), ale díky takto vysoké tvrdosti je zároveň extrémně křehká.

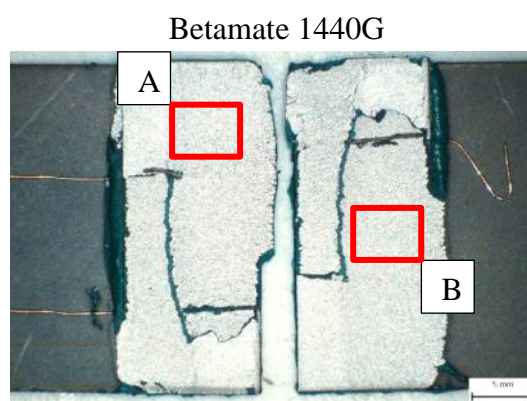
Na obrázcích 3.76 až 3.79 je jasné viditelné, že odtržená intermetalická fáze přesně kopíruje tvar difuzní vrstvy. Difuzní vrstva zůstala pevně přilnuta k základnímu materiálu.

Delaminační typ lomu je zobrazen na obrázku 3.80 pořízeného REM.

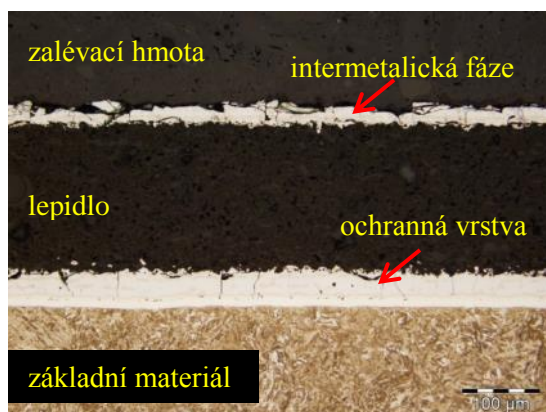
Ukázka lomových ploch vzorku zkoušených za snížené teploty



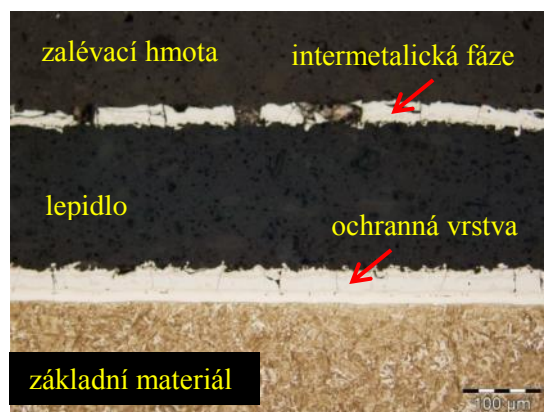
Obr. 3.74: Tvar lomové plochy za snížené teploty, doba TZ 16 minut



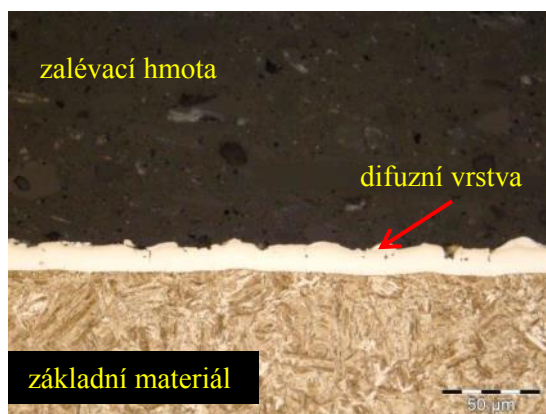
Obr. 3.75: Tvar lomové plochy za snížené teploty, doba TZ 16 minut



Obr. 3.76: Metalografický řez lomovou plochou vzorku v oblasti A (doba tepelného zpracování 16 minut), zv. 200x



Obr. 3.77: Metalografický řez lomovou plochou vzorku v oblasti A (doba tepelného zpracování 16 minut), zv. 200x

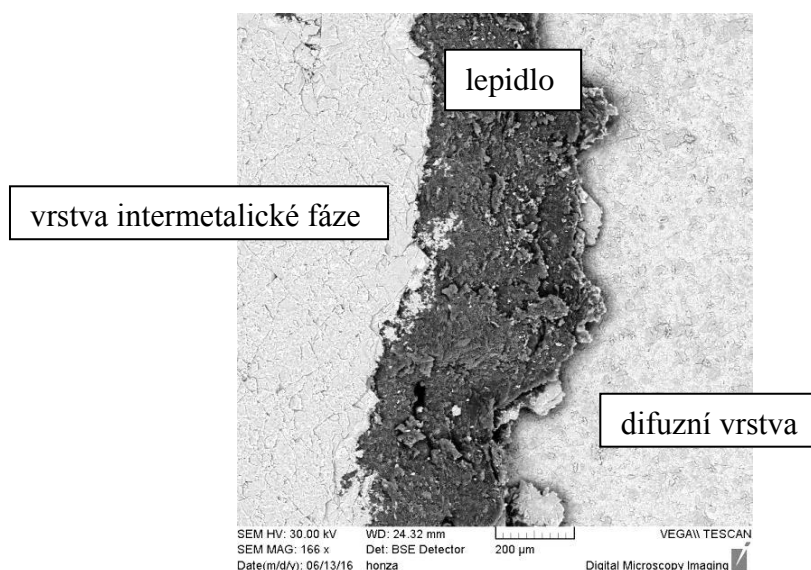


Obr. 3.78: Metalografický řez lomovou plochou vzorku v oblasti B (doba tepelného zpracování 16 minut), zv. 500x

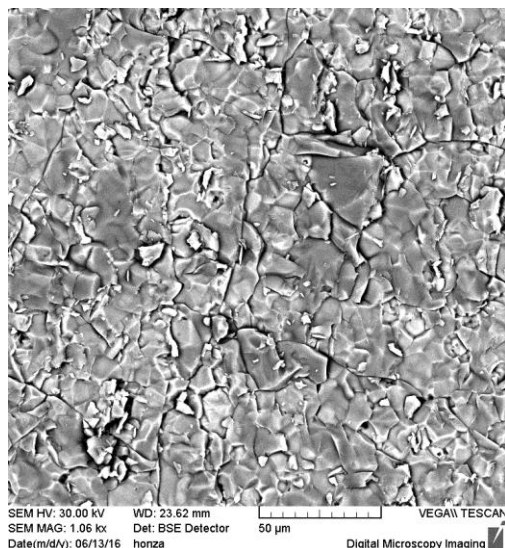


Obr. 3.79: Metalografický řez lomovou plochou vzorku v oblasti B (doba tepelného zpracování 16 minut), zv. 500x

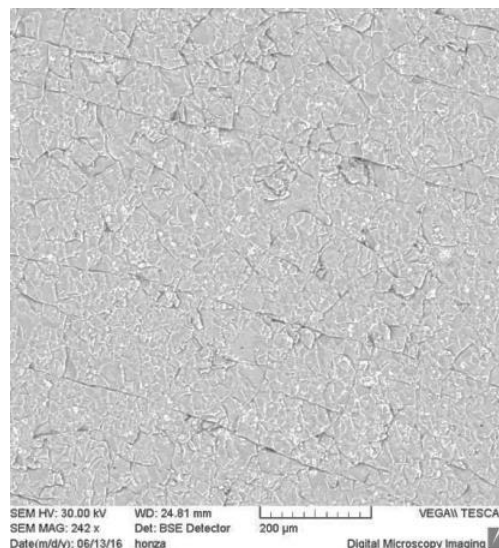
Doplňující obrázky



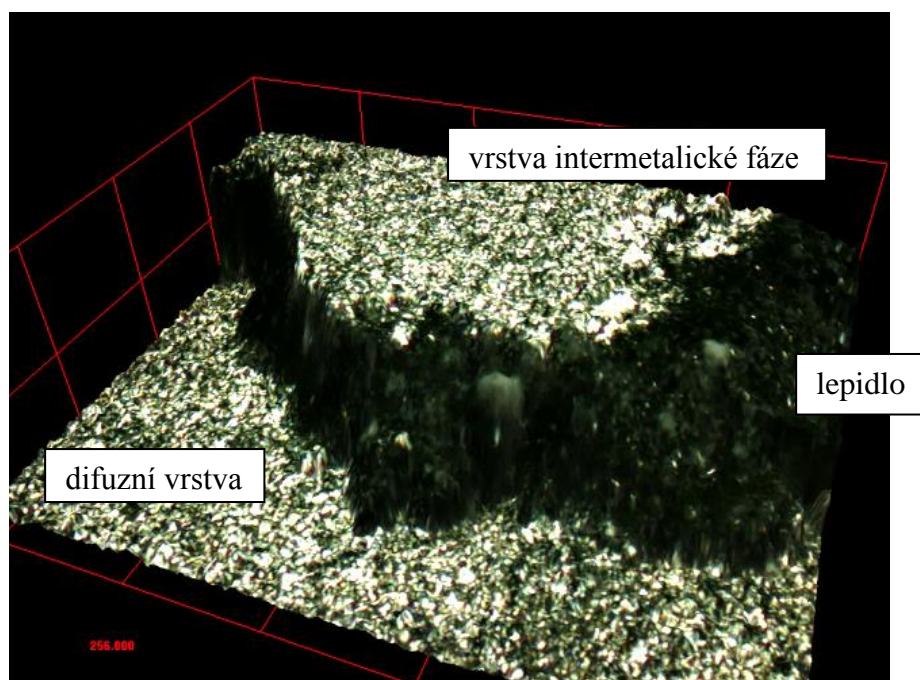
Obr. 3.80: Lomová plocha lepidla Betamate 1440G (-35°C, 12 minut)



*Obr. 3.81: Detail difuzní vrstvy
(Sikapower 492G, -35°C, 12 minut)*



*Obr. 3.82: Detail vrstvy intermetalické
fáze (Betamate) 1440G, -35°C, 12 minut*



Obr. 3.83: Lom ve 3D pohledu (Betamate 1440G, -35°C, 16 minut)

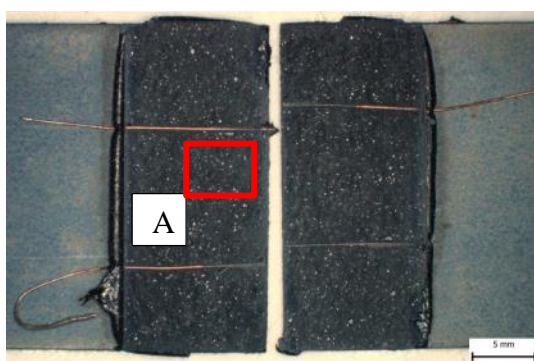
Na obrázku 3.81 viditelný povrch difuzní vrstvy, která se oddělila od vrstvy intermetalické fáze, obrázek 3.82. Obrázek 3.83 ukazuje 3D pohled na strukturu lomu.

3) Vzorky zkoušené za zvýšené teploty (+80 °C)

Lomové plochy vzorků testovaných za zvýšené teploty (+80°C) jsou u obou zkoušených lepidel velmi podobné, viz obrázky 3.84 až 3.87. Zatím co u lepidla Sikapower 492G převažuje především kohezní typ lomu u lepidla Betamate 1440G je zastoupen kromě kohezního typu lomu i adhezní typ lomu, viz obrázky 3.85 a 3.87. V případě lepidla Sikapower 492G byla destrukce lepeného spoje způsobena překonáním kohezních (soudržných) sil lepidla. U lepidla Betamate 1440G došlo k porušení lepeného spoje vlivem překonání kohezních i adhezních (přilnavých) sil. U obou případů nedošlo k porušení Fe-Al-Si intermetalické fáze, jako tomu bylo u předchozích zkoušených vzorků.

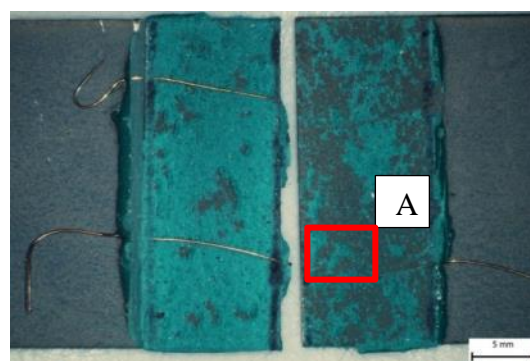
Na zkušebních vzorcích nebyla prokázána závislost mezi druhem lomu a délkou tepelného zpracování.

Sikapower 492G



Obr. 3.84: Tvar lomové plochy za zvýšené teploty, doba tepelného zpracování 8 minut

Betamate 1440G



Obr. 3.85: Tvar lomové plochy za zvýšené teploty, doba tepelného zpracování 8 minut

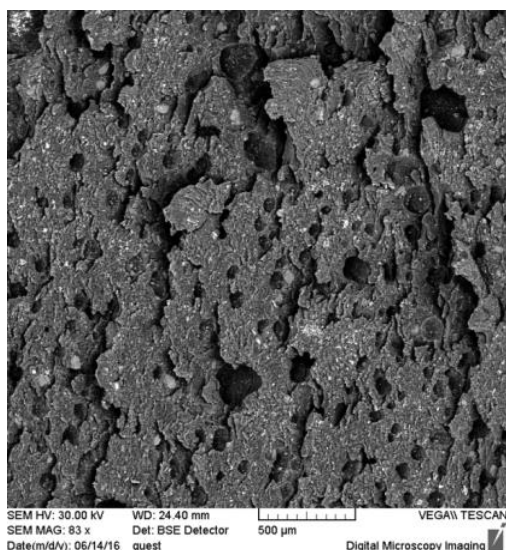


Obr. 3.86: Metalografický řez lomovou plochou vzorku v oblasti (doba tepelného zpracování 8 minut), zv. 200x

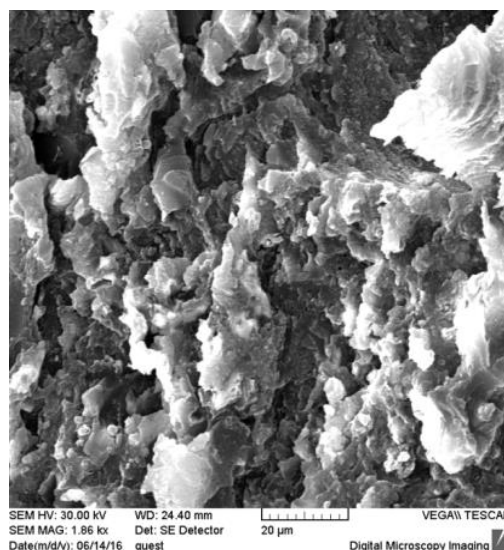


Obr. 3.87: Metalografický řez lomovou plochou vzorku v oblasti (doba tepelného zpracování 8 minut), zv. 200x

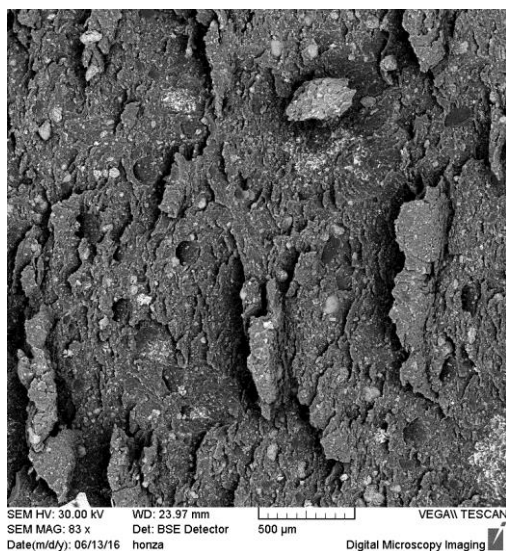
Doplňující obrázky



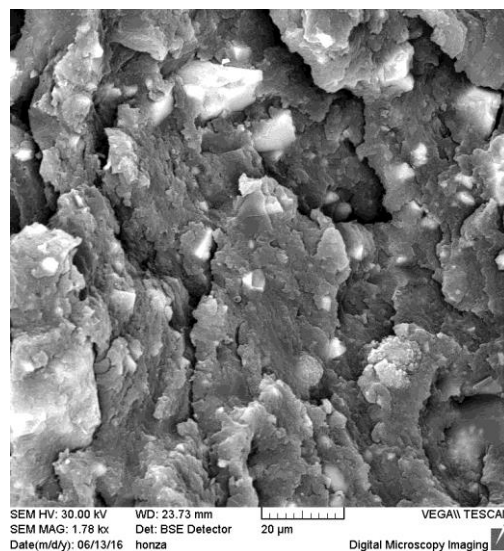
Obr. 3.88: Lomová plocha lepidla (Betamate 1440G, +80°C, 12 minut)



Obr. 3.89: Detail lomové plochy lepidla (Betamate 1440G, +80°C, 12 minut)



Obr. 3.90: Lomová plocha lepidla (Sikapower 492G, +80°C, 12 minut)

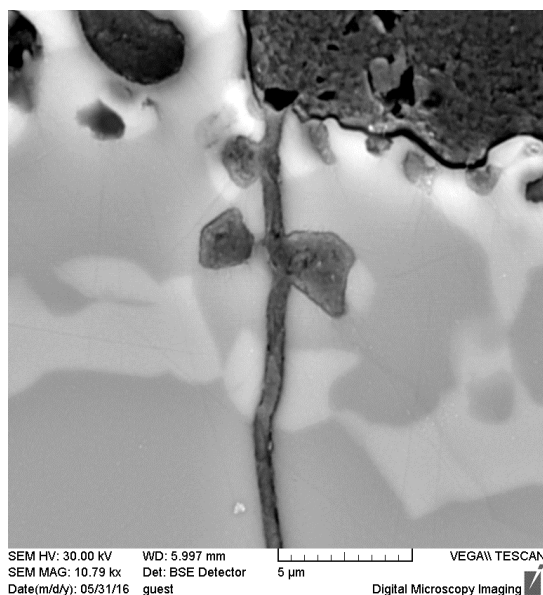


Obr. 3.91: Detail lomové plochy lepidla (Sikapower 492G, +80°C, 12 minut)

Na doplňujících obrázcích 3.88 až 3.91 jsou zobrazeny lomové plochy vzorků testovaných za zvýšené teploty. Jsou zde viditelné tvary lomových ploch, které jsou charakteristické právě pro kohezní typ porušení lepeného spoje.

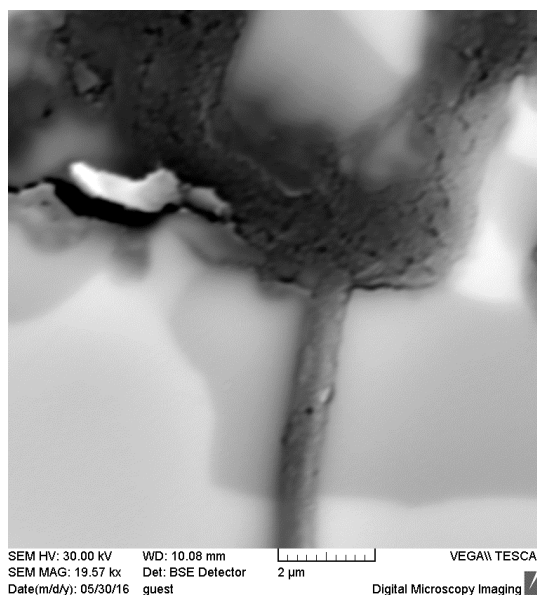
4) Detail zateklého lepidla v trhlině povlaku AlSi

Sikapower 492G



Obr. 3.92: Detail zateklého lepidla v trhlině AlSi povlaku

Betamate 1440G



Obr. 3.93: Detail zateklého lepidla v trhlině AlSi povlaku

U všech analyzovaných lepidel byla zjištěna přítomnost lepidla v trhlině AlSi povlaku, jak je ukázáno na obrázcích 3.92 a 3.93. Tato skutečnost může souviset s naměřenými vyššími hodnotami pevnosti při smykové zkoušce, než které garantuje výrobce v technických listech lepidel. Proto je možné tvrdit, že při lepení lepidel dochází nejen k plošnému vytvoření spoje a i k mechanickému zakotvení lepidla k povrchu substrátu kdy se lepidlo dostává i do mikrotrhlin na povrchu povlaku.

3.6. Analýza lepených spojů testovaných dynamicky

Vzorky pro analýzu lepených spojů testovaných dynamicky byly připraveny stejně jako pro analýzu povrchové vrstvy. Kdy po tepelném zpracování plechů následovalo slepení vzorků. Velikost lepené plochy byla 10x25mm. Slepění vzorků bylo provedeno stejně jako v případě vzorků testovaných staticky opět bez použití přídavného maziva. Celkem bylo připraveno 30 vzorků pro dynamickou zkoušku se stejným tepelným zpracováním plechů jako v případě statické zkoušky. Na obrázku 3.94 je ukázán připravený slepený vzorek pro dynamickou smykovou zkoušku.



Obr. 3.94.: Vzorek pro dynamickou zkoušku

Vzorky byly testovány na Univerzitě Pardubice, fakulta Dopravní Jana Pernera. Pevnost lepených spojů byla testována dynamicky za pokojové teploty (+23 °C). Pro každý interval tepelného zpracování (8, 12 a 16 minut) bylo připraveno 5 zkušebních vzorků. Pro lepení vzorků byly použity dvě epoxidová lepidla (Sikapower 492G a Betamate 1440G). Celkem bylo pro dynamickou smykovou zkoušku připraveno 15 zkušebních vzorků.

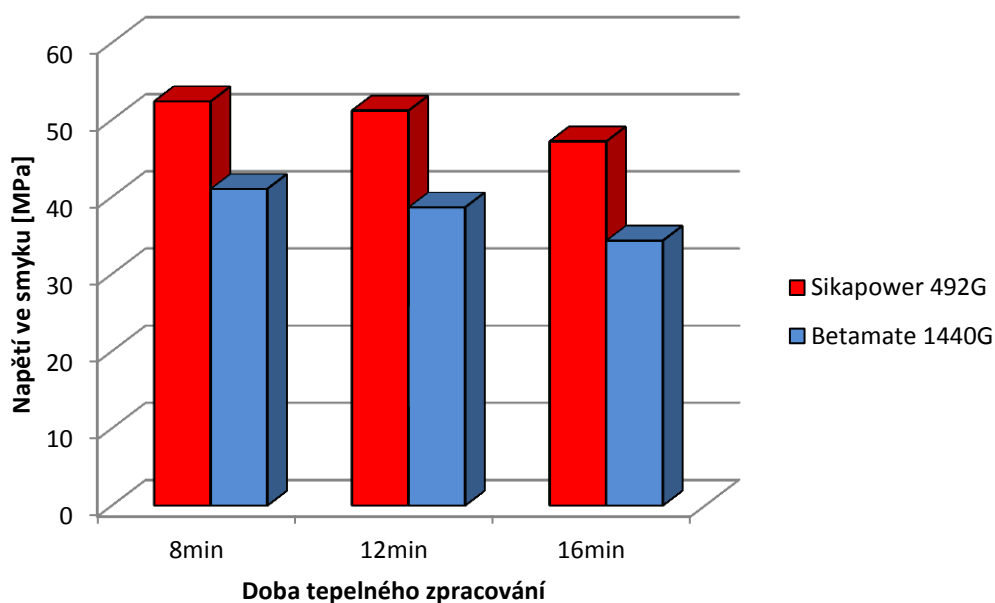
Dynamické zkoušky byly prováděny na zařízení AH 40-300 (rychlý hydraulický válec) jako snímač síly byl použit Kistler 9351B a snímač dráhy Keyence LK-H 087). Rychlost zkoušky byla 15m/s, aby se rychlost zkoušky co nejvíce přibližovala crashovým zkouškám při testování automobilu.

Zkušební vzorky byly zkoušeny za pokojové teploty, rychlostí zkoušky 15 m/s. Typ porušení spoje byl vyhodnocen dle normy ISO 10365. Určování procentuálního rozložení typů lomu na lomové ploše je subjektivní, díky tomu se mohou výsledky vyhodnocení lišit v závislosti na hodnotiteli.

V tabulce 22 jsou uvedeny průměrné hodnoty výsledků dynamické smykové zkoušky získaných z 5 zkušebních vzorků pro každý teplotní interval a pro obě použítá lepidla.

Tab. 22: Naměřené mechanické hodnoty použitého lepidla při dynamické zkoušce za pokojové teploty (+23°C)

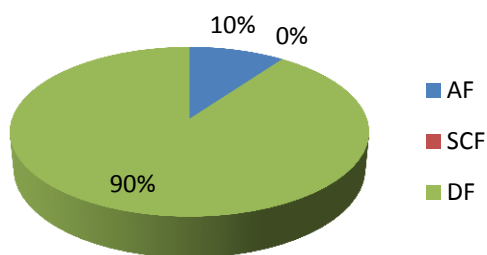
Dynamická zkouška ve smyku			
Mazivo: bez maziva			
Vytvrzeno: 180 °C/20 min		Tloušťka lepidla: 0,2mm	
Lepidlo / Doba substrátu v peci		Sikapower 492G	Betamate 1440G
Pevnost ve smyku [MPa]	8 min	52,5 ± 3,7	41,0 ±
	12 min	51,2 ± 5,1	38,6 ± 2,4
	16 min	47,1 ± 3,7	34,4 ± 2,0



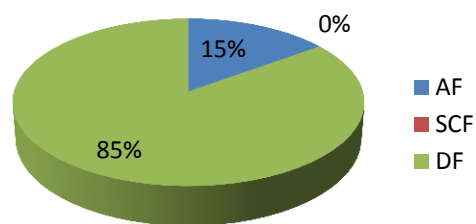
Graf 26: Výsledky dynamické smykové zkoušky za pokojové teploty (+23°C)

Tab. 23: Typ porušení lepených spojů testovaných za pokojové teploty
Sikapower 492G

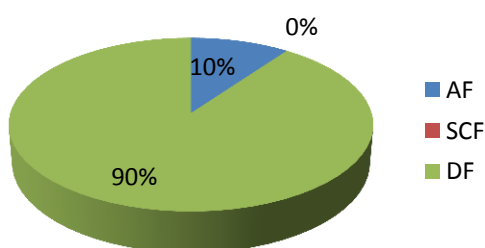
Lepidlo		Sikapower 492G		
Doba substrátu v peci		8 min	12 min	16 min
Typ porušení [%]	AF	10	15	10
	SCF	0	0	0
	DF	90	85	90



Graf 27: Typ porušení lepidla Sikapower 492G, doba TZ - 8 minut



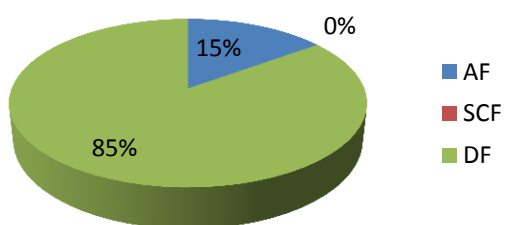
Graf 28: Typ porušení lepidla Sikapower 492G, doba TZ - 12 minut



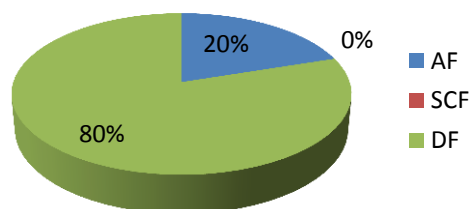
Graf 29: Typ porušení lepidla Sikapower 492G, doba TZ - 16 minut

Tab. 24: Typ porušení lepených spojů testovaných za pokojové teploty
Betamate 1440G

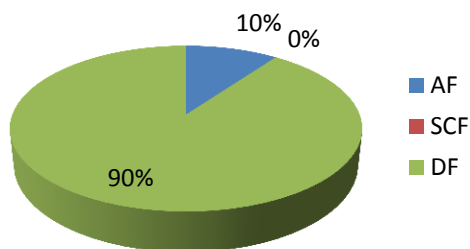
Lepidlo		Betamate 1440G		
Doba substrátu v peci		8 min	12 min	16 min
Typ porušení [%]	AF	15	20	10
	SCF	0	0	0
	DF	85	80	90



Graf 30: Typ porušení lepidla Betamate 1440G, doba TZ - 8 minut



Graf 31: Typ porušení lepidla Betamate 1440G, doba TZ - 12 minut

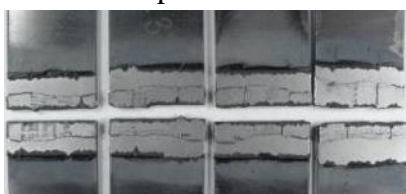


Graf 32: Typ porušení lepidla Betamate 1440G, doba TZ - 16 minut

V tabulce 22 jsou zapsány hodnoty naměřené při dynamické smykové zkoušce. Naměřené hodnoty dynamické zkoušky jsou vyšší než naměřené hodnoty při statické zkoušce smykové pevnosti. Z tabulek 23 a 24 i grafů 27 až 32 je patrné že hlavním typem porušení bylo delaminační s adhezním. Kdy u lepidla Sikapower byl poměr adheznímu ku delaminačnímu nižší než u lepidla Betamate. Dále bylo zjištěno, že se u obou lepidel mírně snižuje pevnost lepeného spoje s dobou tepelného zpracování plechu. Výsledky dynamické smykové zkoušky jsou přehledně shrnuty v grafu 26.

Ukázka lomových ploch zkušebních vzorků po dynamické zkoušce

Sikapower 492G

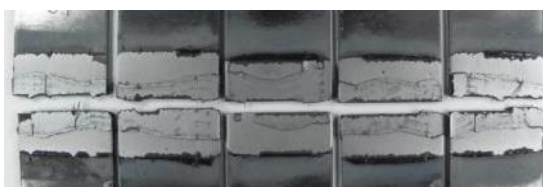


Obr. 3.95: Lomové plochy vzorků testovaných za pokojové teploty, doba tepelného zpracování 8 minut

Betamate 1440G



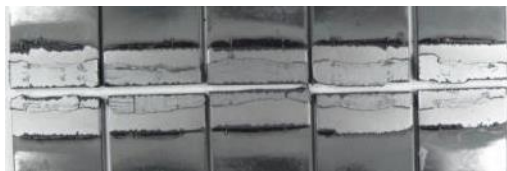
Obr. 3.96: Lomové plochy vzorků testovaných za pokojové teploty, doba tepelného zpracování 8 minut



Obr. 3.97: Lomové plochy vzorků testovaných za pokojové teploty, doba tepelného zpracování 12 minut



Obr. 3.98: Lomové plochy vzorků testovaných za pokojové teploty, doba tepelného zpracování 12 minut



Obr. 3.99: Lomové plochy vzorků testovaných za pokojové teploty, doba tepelného zpracování 16 minut



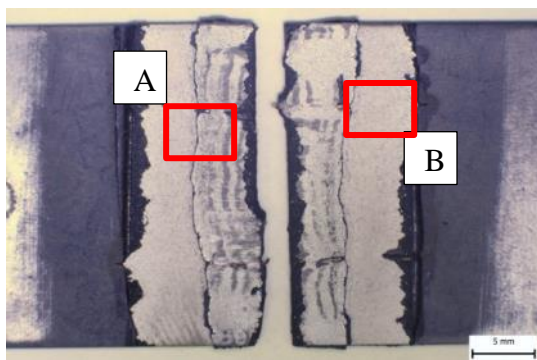
Obr. 3.100: Lomové plochy vzorků testovaných za pokojové teploty, doba tepelného zpracování 16 minut

Na obrázcích 3.95 až 3.100 jsou zdokumentovány lomové plochy vzorků testovaných dynamicky za pokojové teploty.

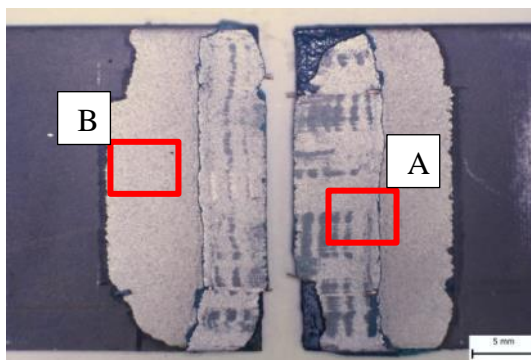
3.6.1. Analýza porušení lepených spojů testovaných dynamicky

U všech testovaných vzorků došlo k porušení lepeného spoje na rozhraní difuzní vrstvy a vrstvy intermetalické fáze (Fe-Al-Si). Tento typ porušení je zapříčiněn vysokou tvrdostí a zároveň křehkostí vrstvy Fe-Al-Si. Z lomových ploch je dále dobře viditelné jakoby „zvlnění“ lomové plochy. Lomová plocha je ve skutečnosti hladká jako u předchozích vzorků, „zvlnění“ je pouze optické. Má ho za následek lepidlo, které pravděpodobně zateklo do mikrotrhlin na povrchu ochranné vrstvy, při smykové dynamické zkoušce došlo k jeho „setření“. Tato skutečnost by nasvědčovala, že došlo nejen k delaminačnímu, ale i k adheznímu druhu lomu.

Na obrázcích č. 3.101 až 3.106 je dobře viditelné odtržení intermetalické fáze od difuzní vrstvy.



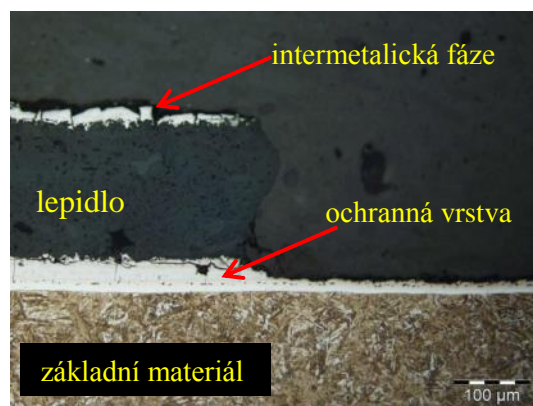
Obr. 3.101: Tvar lomové plochy lepidla Sikapower 492G, doba tepelného zpracování 8 minut



Obr. 3.102: Tvar lomové plochy lepidla Betamate 1440G, doba tepelného zpracování 16 minut



Obr. 3.103: Metalografický řez lomovou plochou lepidla Sikapower 492G v oblasti A (doba tepelného zpracování 8 minut)



Obr. 3.104: Metalografický řez lomovou plochou lepidla Betamate 1440G v oblasti A (doba tepelného zpracování 16 minut)



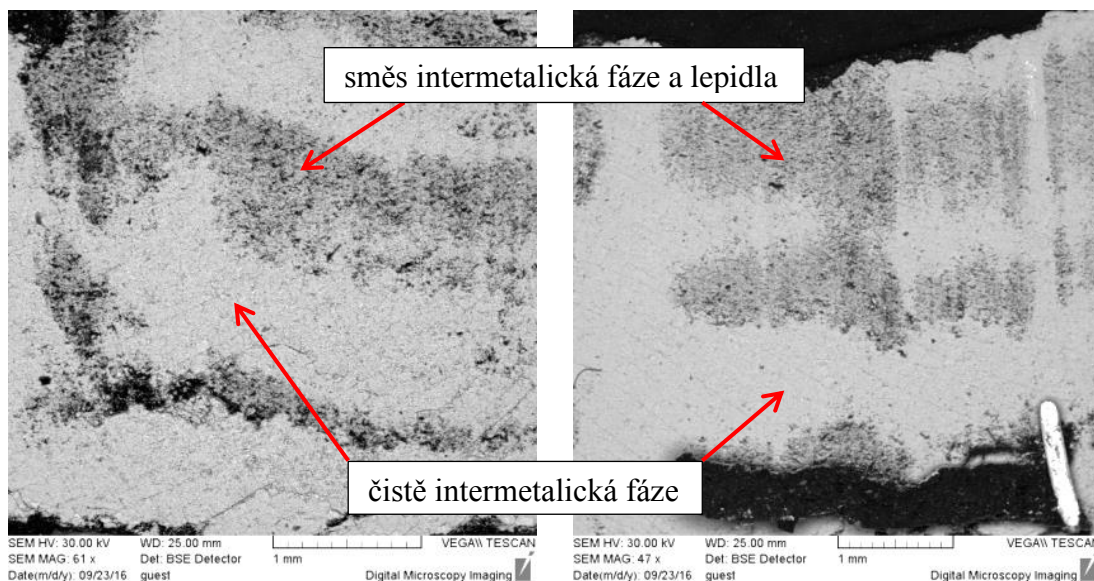
Obr. 3.105: Metalografický řez lomovou plochou lepidla Sikapower 492G v oblasti B (doba tepelného zpracování 8 minut)



Obr. 3.106: Metalografický řez lomovou plochou vzorku lepidla Betamate 1440G v oblasti B (doba tepelného zpracování 16 minut)

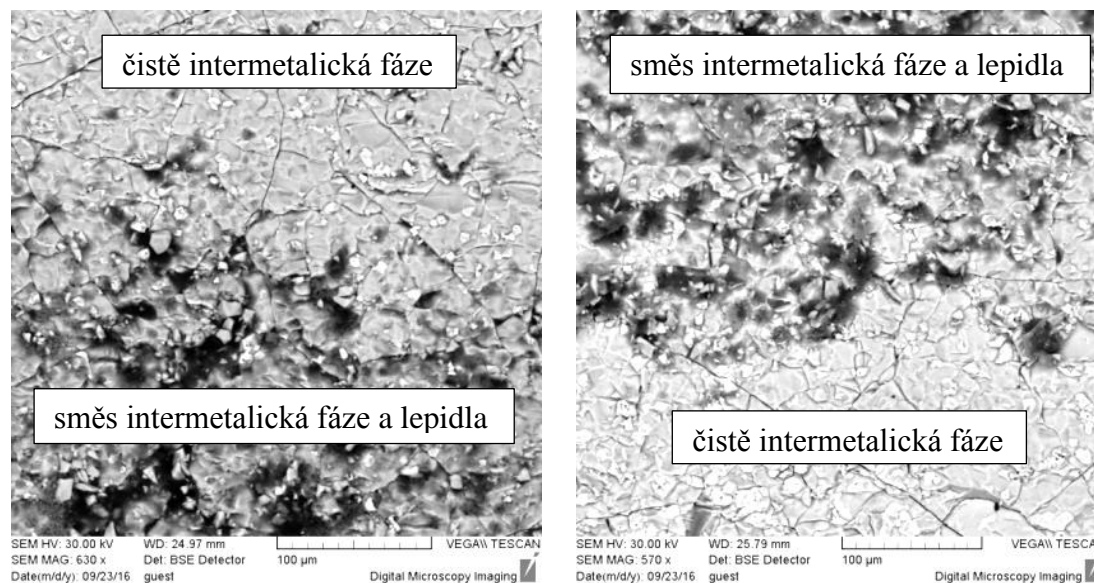
Doplňující obrázky 3.107 až 3.110 a obrázky 3.113 a 3.114 ukazují lomové plochy, na kterých je viditelná směs intermetalické fáze s lepidlem a čistá intermetalická fáze. Na obrázcích 3.111 a 3.112 je viditelný detail difuzní vrstvy, která se odtrhla od vrstvy intermetalické fáze při dynamické smykové zkoušce.

Doplňující obrázky



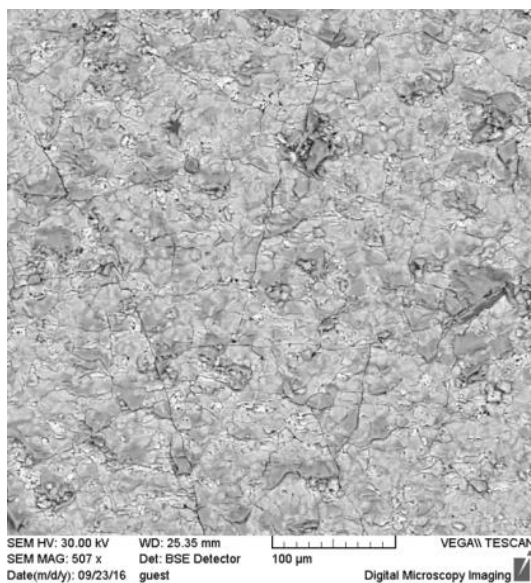
Obr. 3.107: Lomová plocha lepidla Sika-power 492G, doba tepelného zpracování 8 minut

Obr. 3.108: Lomová plocha lepidla Betamate 1440G, doba tepelného zpracování 16 minut

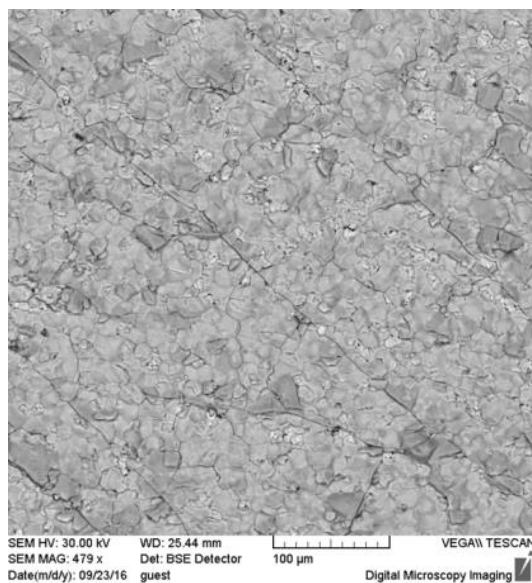


Obr. 3.109: Detail lomové plochy lepidla Sikapower 492G, doba tepelného zpracování 8 minut

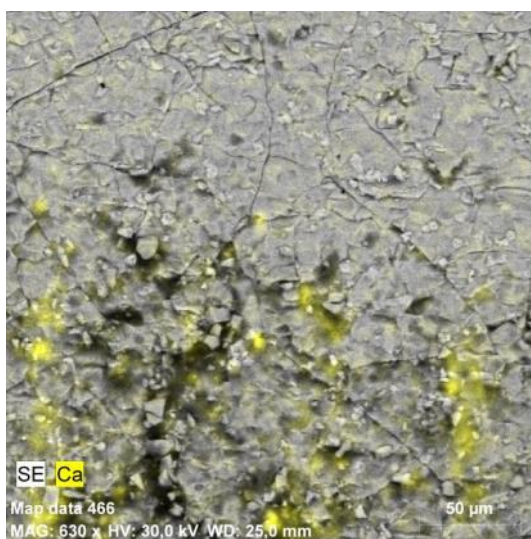
Obr. 3.110: Detail lomové plochy lepidla Betamate 1440G, doba tepelného zpracování 16 minut



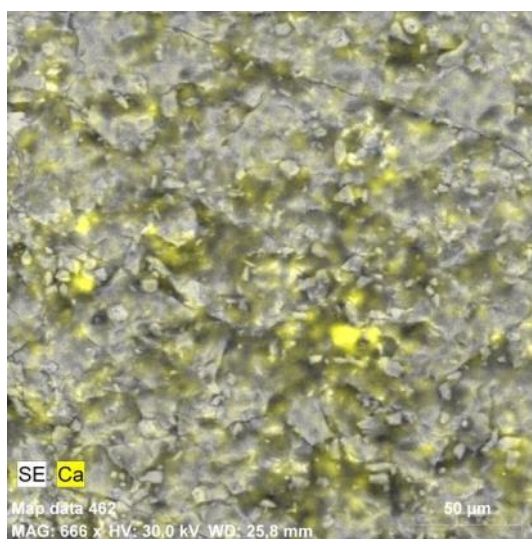
Obr. 3.111: Detail difuzní vrstvy lepidla Sikapower 492G, doba tepelného zpracování 8 minut



Obr. 3.112: Detail difuzní vrstvy lepidla Betamate 1440G, doba tepelného zpracování 16 minut



Obr. 3.113: Chemická analýza lomové plochy, lepidlo Sikapower 492G



Obr. 3.114: Chemická analýza lomové plochy, lepidlo Betamate 1440G

4. Shrnutí výsledků

Cílem diplomové práce bylo zjistit vliv Al-Si povlaku, u různě tepelně zpracovaných ocelí 22MnB5, na pevnost spojů lepených epoxidovými pevnostními lepidly. Jako reprezentativní zkouška byla zvolena zkouška pevnosti ve smyku při zatěžování tahem dle normy PV 12.35.

K tomu, aby bylo možné zjistit vliv AlSi vrstvy na pevnost lepeného spoje musela být tato vrstva podrobena zkoušce pevnosti ve smyku při zatěžování tahem dle normy PV 12.35. K vyhodnocení byla použita analýza pomocí elektronového mikroskopu, dále pak bylo určeno chemické složení s morfologií povrchu vrstvy a nakonec byla provedena metalografická zkouška. Analyzovány byly plechy s různou dobou tepelného zpracování (8, 12 a 16 minut). Teplota tepelného zpracování byla pro všechny plechy konstantní a to 900 °C.

Analýzou chemického složení bylo zjištěno, že doba tepelného zpracování nemá významný vliv na výsledné chemické složení povrchové vrstvy a je tedy u všech tří časových intervalů doby tepelného zpracování velmi podobné. Morfologie povrchu AlSi vrstvy opět prokázala, že všechny časové intervaly mají velmi podobnou morfologii svého povrchu. Elektronovým mikroskopem byla zjištěna přítomnost mikrotrhlin na povrchu AlSi vrstvy. Přítomnost těchto trhlin byla následně prokázána i při provedení příčného řezu a následnou metalografickou zkouškou. Metalografickou zkouškou bylo zjištěno, že mikrotrhlina se šíří od povrchu AlSi vrstvy až do difuzní vrstvy. Mikrotrhlina se objevují u všech tří intervalů doby tepelného zpracování. Dále bylo provedeno měření celkové tloušťky ochranné vrstvy a měření tloušťky difuzní vrstvy. Měřením bylo zjištěno, že celková tloušťka ochranné vrstvy je u všech intervalů tepelného zpracování velmi podobná, jediná menší odlišnost je u doby tepelného zpracování 8 minut, kdy je horní hranice rozměrů vrstvy nižší oproti ostatním dobám tepelného zpracování cca. 5 – 6 μm . Naopak velký rozdíl je v tloušťce difuzní vrstvy, která se u všech intervalů doby tepelného zpracování výrazně liší. Rozdíl mezi dobou zpracování 8 a 12 není nijak zásadní, jedná se cca. o 2 μm . Velký rozdíl v tloušťce difuzní vrstvy nastává mezi dobou intervalu 12 a 16 minut. Zde je rozdíl v tloušťce difuzních vrstev již cca. 4 μm . Díky těmto skutečnostem je patrné, že dochází k výraznému nárůstu tloušťky difuzní vrstvy, při del-

ším pobytu materiálu v peci. Dále pak bylo zjištěno, že s délkou tepelného zpracování souvisí i barevný odstín povrchu plechu. Při kratší době tepelného zpracování (8 minut) je barva plechu tmavě modrá, po 12 minutovém pobytu v peci má plech barvu modrošedou a po 16 minutách je barva plechu šedá.

Dále byla provedena analýza lepených spojů. Prvním zkušebním hlediskem byla statická zkouška pevnosti ve smyku dle normy PV 12.35. Zkouška PV 12.35 probíhala při třech různých teplotách zkušební vzorku $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Výsledky vzorků testovaných za pokojové teploty $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ukázaly, že lepidlo Sikapower 492G dosáhlo nejvyšší hodnoty pevnosti ve smyku u plechů s dobou tepelného zpracování 8 minut. Nicméně jeho pevnost se délkou doby tepelného zpracování plechů mění a má klesající charakter. U lepidla Betamate 1440G jsou hodnoty pevnosti ve smyku u všech intervalů tepelného zpracování plechu velmi podobné, téměř shodné. Typ porušení je u obou lepidel odlišný, zatím co u lepidla Sikapower došlo ke kombinaci lomu speciálně kohezného s delaminačním u lepidla Betamate byl pozorován hlavně delamininační typ porušení lepeného spoje.

Při teplotě zkoušky $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ bylo zjištěno, že nejvyšší pevnosti dosahuje lepidlo Sikapower 492G u plechu s délkou tepelného zpracování 8 minut. Zbylé plechy s délkou tepelného zpracování 12 a 16 minut o něco menší mez pevnosti ve smyku, cca. o $0,3\text{ MPa}$ u plechu s TZ 12 minut a cca. $4,5\text{ MPa}$ u plechu s TZ 16 minut. U plechu s TZ 8 minut je 16% pokles v pevnosti ve smyku u lepidla Betamate oproti lepidlu Sikapower. U plechu s TZ 12 minut je pokles o 26% a u plechu s TZ 16 minut o 13,5%. Celkově lze tedy říci, že se lepidlo Sikapower lépe vyrovnalo s namáháním za nízké teploty oproti lepidlu Betamate 1440G. Co se týče druhu porušení lepeného spoje u všech zkušebních vzorků byl identifikován delaminační typ porušení a to jak u lepidla Sikapower 492G tak i lepidla Betamate 1440G, rovněž na typ porušení neměla vliv délka tepelného zpracování. Tento typ porušení souvisí s křehnutím materiálů při nízkých teplotách, kdy dochází ke snížení jejich pevnosti. Jedná se tedy o porušení vrstvy povrchové úpravy substrátu, nikoliv o porušení lepidla.

Hodnoty pevnosti ve smyku u vzorků testovaných za zvýšené teploty $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ jsou u obou použitých lepidel velmi podobné, je zde i pouze nepatrný rozdíl v jejich pevnosti v závislosti na době tepelného zpracování. Co se týče typu porušení, došlo u lepidla Sikapower především ke koheznímu typu lomu doprovázeného speciálním kohezním typem porušení bez závislosti na době tepelného zpracování. U lepidla Betamate nebylo jednoduché jednoznačně určit o jaký typ porušení se jedná. Typ porušení u lepidla Betamate je složen z větší části z kohezního a ze speciálně kohezního typu porušení. Objevuje se zde ale i adhezní typ porušení, který je u lepidel přípustný pouze do 20 % plochy lepeného spoje. Typ porušení nesouvisí s dobou tepelného zpracování. Celkově zle říci, že zvýšená teplota zkoušky má negativní vliv na mechanické vlastnosti lepidel a tím i na pevnosti lepeného spoje.

V další části experimentu byla analýza porušení lepených spojů testovaných staticky. V této části byl zkoumán tvar lomové plochy a určení, kde přesně došlo k destrukci povrchové vrstvy materiálu.

U vzorků testovaných za snížené teploty $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ byl u obou druhů lepidel identifikován delaminační typ porušení lepeného spoje. Tento typ porušení vznikl bez ohledu na dobu tepelného zpracování. Analýzou bylo zjištěno, že k porušení došlo na rozhraní difuzní vrstvy a vrstvy intermetalické fáze. Tato skutečnost souvisí s vysokou tvrdostí vrstvy intermetalické fáze, která dosahuje až 1100 Vickersů. Díky takto vysoké tvrdosti je zároveň vrstva intermetalické fáze extrémně křehká. Povrch lomové plochy intermetalické fáze je hladký a přesně kopíruje povrch difuzní vrstvy.

Na vzorcích testovaných za pokojové teploty $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ byl u lepidla Sikapower 492G identifikován smíšený typ porušení lepeného spoje. Jednalo se o speciálně kohezní a delaminační typ lomu, kdy rozložení těchto typů lomu bylo na lepené ploše rovnoměrné, bez zjevné závislosti na době tepelného zpracování plechu. Typ lomu u lepidla Betamate 1440G byl převážně delaminační, jen u doby TZ 8 minut, byl pozorován i speciálně kohezní typ lomu, které spolu s narůstající dobou tepelného zpracování vymizel.

Vzorky testované za zvýšené teploty $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ jsou si typem lomové plochy velmi podobné. U obou druhů lepidel došlo ke koheznímu typu lomu u lepidla Sikapower se jedná o čistě kohezní lom zatím co u lepidla Betamate je zastoupen i lom

adhezní, který je u lepených spojů přípustný na maximálně 20% lepené plochy. Tím, že došlo převážně ke kohezním lomům, zůstala ochranná vrstva bez poškození a celistvá. Na vzorcích nebyla prokázána souvislost mezi typem porušení a dobou tepelného zpracování.

Velmi zajímavým zjištěním byla přítomnost lepidla uvnitř mikrotrhlin, které jsou v intermetalické fázi povlakové vrstvy. Tento poznatek spolu s velmi členitým povrchem ochranné vrstvy může souviset i s vyšší hodnotou meze pevnosti ve smyku, která byla u slepených vzorků naměřena oproti pevnosti lepidla, která je předepsána v materiálových listech lepidel.

Poslední částí experimentu bylo provedení dynamické zkoušky lepených spojů za pokojové teploty. Vzorky byly testovány při rychlosti zkoušky 15 m/s (cca. 54 km/h). Tato rychlost odpovídá rychlostem při crashových zkouškách automobilů. Jako nejlépe se s dynamickým namáháním vyrovnalo lepidlo Sikapower 492G s dobou substrátu v peci 8 minut. Kdy je u něj patrné téměř o 25% vyšší pevnost oproti lepidlu Betamate 1440G se stejnou dobou substrátu. Celkově lze říci, že lepidlo Sikapower vyšlo při dynamické zkoušce lépe než lepidlo Betamate a to bez ohledu na dobu tepelného zpracování substrátu. Pevnost lepeného spoje klesá se spolu s dobou pobytu substrátu v peci při tepelném zpracování. Typ porušení spoje u dynamicky zkoušených vzorků kombinovaný. O obou lepidlech je z větší části zastoupen delaminačním typem porušení, který doplňuje adhezní typ. Dále je na lomových plochách viditelné jakési „zvlnění“. Toto „zvlnění“ je pouze optického charakteru nikoliv mechanického. Na metalografických řezech bylo viditelné, že opět došlo k odtržení intermetalické fáze Al-Si-Fe od difuzní vrstvy stejně jako u delaminačního typu porušení. Lze se tedy domnívat, že lepidlo zateče do mikrotrhlin, které jsou na povrchu AlSi vrstvy po tepelném zpracování a vlivem vysoké rychlosti zkouškou dojde k „smáznutí“ lepidla na rozhraní intermetalické a difuzní vrstvy.

5. Závěr

Celkově lze hodnotit lepené spoje materiálu 22MnB5 pomocí epoxidových pevnostních lepidel, jako velmi zajímavé a to jak z hlediska mechanických vlastností, tak i kvůli typu jejich typu porušení. U většiny vzorků byly naměřeny vyšší hodnoty pevnosti ve smyku, než je předepsáno na technických listech použitých lepidel s výjimkou vzorků testovaných za zvýšené teploty.

Další zajímavým zjištěním byl typ porušení lepeného spoje, kdy zde byl zjištěn výskyt delaminačního typu porušení, který souvisí s použitým substrátem nikoliv s používaným lepidlem. K porušení spoje vždy došlo na přechodu intermetalické a difuzní vrstvy povlaku substrátu. Z toho tedy plyne, že kohezní síly v lepidle jsou vyšší než soudržnost obou vrstev.

Z diplomové práce jasně vyplývá, že pevnost lepeného spoje je závislá především na použitém AlSi povlaku, nikoliv na druhu použitého epoxidového lepidla. Nejslabším článkem lepeného spoje se nachází na rozhraní intermetalické a difuzní vrstvy, kde jsou kohezní síly v této oblasti nižší, než ve zbytku lepeného systému. Dalším zjištěním bylo zatečení lepidla do mikrotrhlin na povrchu AlSi povlaku, které se vytváří při chladnutí materiálu. Tato skutečnost by mohla mít za následek vyšší pevnost lepených spojů, než bylo předpokládáno.

Problematika lepení vysokopevnostních plechů je v automobilovém průmyslu velmi zajímavou a do budoucna perspektivní metodou spojování materiálů. Dalším možným rozšířením této problematiky by mohlo být zkoumání kombinací různých druhů plechů s různou povrchovou úpravou. Jako například 22MnB5 plechy s AlSi povlakem a hlubokotažné plechy se zinkovým povlakem a další různé druhy ocelových plechů.

Kombinací různých substrátů s různými povlaky lepených pomocí epoxidových lepidel je nepřeberné množství a není možné je všechny obsáhnout v jedné diplomové práci, proto by byl zajímavý další výzkum této oblasti automobilového průmyslu.

Seznam použité literatury

- [1] Automotive Steel Definitions. *www.worldautosteel.org* [online]. 2015 [cit. 2015-09-01]. Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-steel-definitions/>
- [2] Hot-Formed (HF) Steel. *www.worldautosteel.org* [online]. 2015 [cit. 2015-09-01]. Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/hot-formed-hf-steel/>
- [3] Škoda auto a.s., Škoda Media Portál. *www.skoda-auto.cz*. [Online] 1. 1. 2015. [Citace: 4. 9. 2015.] https://media.skoda-auto.com/cs/_layouts/Skoda.PRPortal/pictures.aspx?q=2014+prodej+Nov%C3%A1+Fabia+Rapid+Spaceback+Combi+2015+Auto+roku+Oeljeklaus+VIP+zam%C4%9Bstnanci+Fabia&type=8&category=0.
- [4] Steel for hot stamping - Usibor. *Automotive.arcelormittal.com* [online]. 2015 [cit. 2015-08-31]. Dostupné z: <http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/UHSS/Usibor/EN#>
- [5] Nové tvářecí technologie pro výrobu karoserií. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2011 [cit. 2015-09-04]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-tvareci-technologie-pro-vyrobu-karoserii.htm>
- [6] INDUSTRIAL LASER SOLUTIONS. *Industrial-lasers.com* [online]. 2015 [cit. 2015-09-06]. Dostupné z: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-29/issue-1/features/laser-technologies-in-the-hot-stamping-process-chain.html>
- [7] *Usibor colours*. Ostrava, 2008.
- [8] PETR, Jaroslav. *Vliv technologických parametrů na metalurgii svarového spoje u vysokopevných ocelových plechů s povlakem na bázi Al-Si*. Praha, 2015. Rešerše doktorandské práce. ČVUT.
- [9] LEMFELD, Jan. *Vlastnosti lepeného spoje při zatěžování za nízkých teplot*. Liberec, 2011. Diplomová práce. TU v Liberci

- [10] KOLNEROVÁ, Michaela. Technologie lepení v automobilovém průmyslu. www.ksp.tul.cz/ [online]. 2008 [cit. 2015-09-05]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/lepeni.pdf
- [11] Test types. *Instron* [online]. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://image.slidesharecdn.com/packagingtestingslidesharefinal-141124101817-conversion-gate01/95/tips-tricks-for-packaging-testing-7-638.jpg?cb=1416828659>
- [12] BOBEK, Jiří. *LABORATOŘ ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ*. Liberec, 2012.
- [13] ČSN ISO 10365: *Lepidla. Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. 3. Pardubice: Český normalizační institut, 1995.
- [14] Tescan Vega-II XMU SEM. [Nif.carleton.ca](http://nif.carleton.ca) [online]. 2011 [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: <http://nif.carleton.ca/sites/default/files/tescan-1.jpg>
- [15] Olympus Launches Confocal Laser Scanning Microscope "OLS 3000" [online]. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://www.olympus-global.com/en/news/2004a/nr040326ols3e.jsp>
- [16] GX71 Motorized Components and PC control diagram. Olympus-ims.com [online]. 2013 [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: http://static4.olympus-ims.com/data/Image/IM/inverted/GX71_motorized_components_diagram.jpg?rev=642A
- [17] ČSN EN ISO 6892-1: *Kovové materiály. Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [18] TL 4225: Alloyed Quenched and Tempered Steel for Press Quenching – Uncoated or Pre-Coated. Konzernnorm Volkswagen AG, 2016.
- [19] PV 12.35 Testing of tensile shear strength. Konzernnorm Volkswagen AG, 2007.